



BEniVer

Begleitforschung Energiewende im Verkehr

FACT SHEETS

Normkonformität und Materialverträglichkeit alternativer Kraftstoffe

Herausgebende

Jens Artz

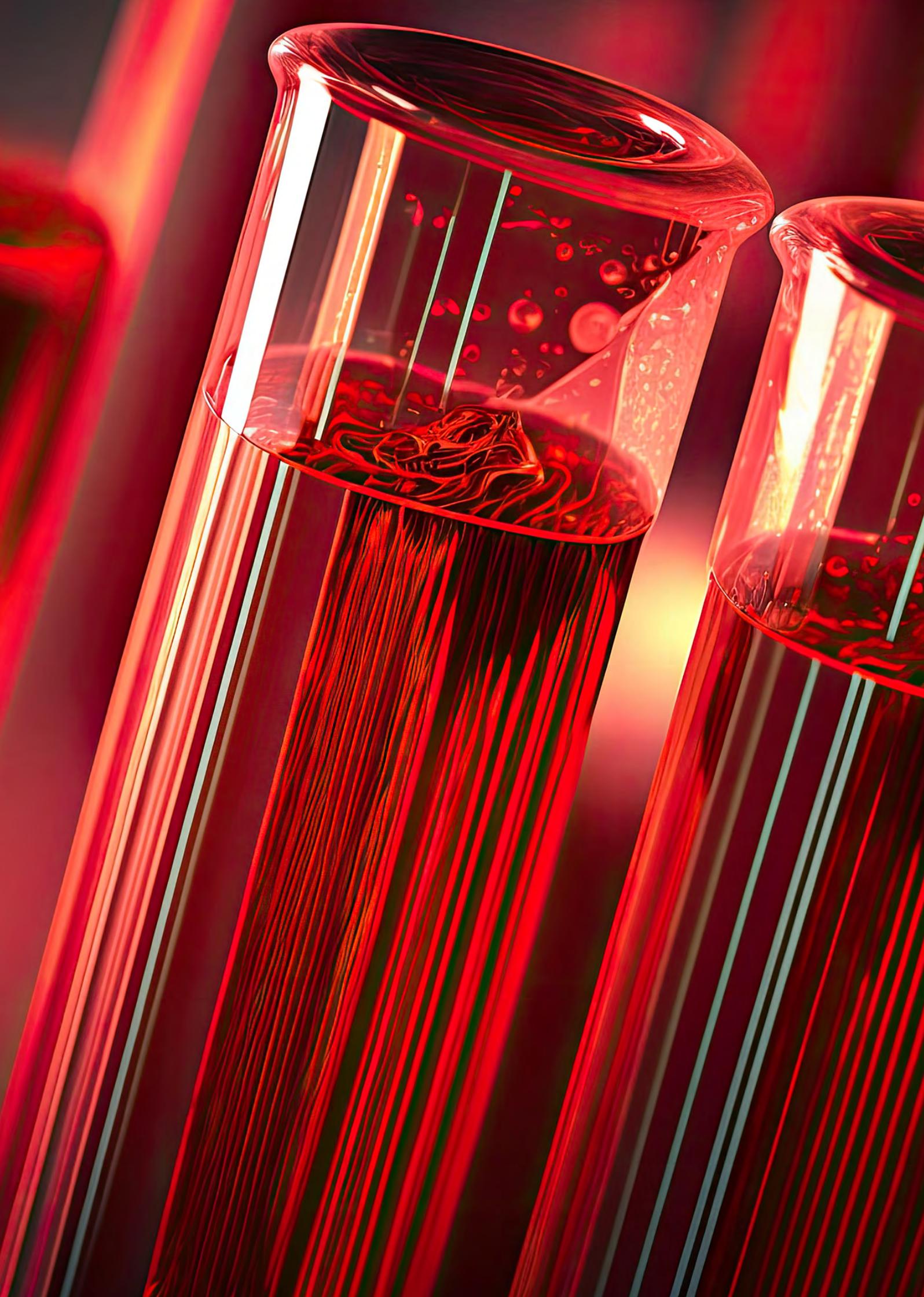
Philip Ruff

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Klimaschutz

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages



FACT SHEETS

Normkonformität und Materialverträglichkeit alternativer Kraftstoffe

Herausgebende

Jens Artz

Philip Ruff



Begleitforschung Energiewende im Verkehr

Erstellt im Rahmen der Begleitforschung
zur Förderinitiative »Energiewende im
Verkehr« (BEniVer)

- › Arbeitspaket 3:
Kraftstoffnutzung
- › Unterarbeitspaket 3.4:
Normkonformität alternativer Kraftstoffe
(NormAKraft)
- › gefördert durch das Bundesministerium
für Wirtschaft und Klimaschutz
- › betreut durch Projektträger Jülich

FKZ: 03EIV241

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Klimaschutz

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Vorwort

Liebe Leserin, lieber Leser,

nicht jeder Kraftstoff oder Treibstoff, der die technische Eignung besitzt, in Motoren oder Triebwerken eingesetzt zu werden, darf ohne Weiteres als solcher am Markt gehandelt werden. Zuvor müssen diese eine ganze Reihe gesetzlicher und regulatorischer Anforderungen erfüllen.

Für fossile Energieträger wie Benzin, Diesel oder Kerosin existiert ein historisch gewachsener regulatorischer Rahmen aus nationalen und internationalen Normen, Verordnungen, Richtlinien und Gesetzen, die kontinuierlich aktualisiert und weiterentwickelt werden – zum Beispiel um einheitliche, gleichbleibende Kraftstoffqualitäten für spezifische Anwendungen zu garantieren.

Um den Markt zukünftig auch für alternative »grüne« Kraftstoffe zu öffnen, die synthetisch oder durch biogene Verfahren hergestellt werden, ist frühzeitig zu prüfen, inwiefern diese die bestehenden technischen und regulatorischen Anforderungen bereits erfüllen. Für Kraftstoffe und deren Mischungen, die im aktuellen regulatorischen Rahmen nicht erfasst sind, müssen neue Normen entwickelt (oder bestehende angepasst) und diese wiederum in die entsprechenden Richtlinien und Verordnungen aufgenommen werden. Da dies mitunter einen mehrjährigen Prozess umfasst, sollte mit entsprechenden Arbeiten bereits in einer frühen Entwicklungsphase der Kraftstoffe begonnen werden. Andernfalls verzögert sich ggf. eine spätere Inverkehrbringung.

Um solche Kraftstoffe von der Herstellung bis zur Anwendung und darüber hinaus bis zur Marktreife zu entwickeln, werden verschiedene Forschungsprogramme u.a. durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) oder das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) gefördert. Erwähnenswert sind hier insbesondere die Förderinitiative »Energiewende im Verkehr« des BMWK und das Projekt NAMOSYN des BMBF.



In diesen Forschungsprogrammen wird eine ganze Reihe synthetischer Kraftstoffe beforcht. Diese umfassen u.a. synthetischen Diesel, synthetisches Benzin und synthetisches Kerosin, die in ihren chemischen und physikalischen Eigenschaften weitgehend identisch zu den heutigen fossilen Kraftstoffen sind. Darüber hinaus kommen Methanol (und dessen Derivate), langkettige Alkohole (z.B. Oktanol) und gasförmige Stoffe wie Methan, Wasserstoff oder auch Ammoniak in Frage.

Das Projekt »NormAKraft – Normkonformität alternativer Kraftstoffe« als Teilvorhaben der Begleitforschung zur Förderinitiative »Energiewende im Verkehr« (BEniVer) des BMWK hat zum Ziel, die sich gegenwärtig in der Entwicklung befindlichen alternativen Kraftstoffe und Kraftstoffmischungen frühzeitig auf ihre Normkonformität und Materialverträglichkeit hin zu evaluieren und hierzu noch in der Entwicklungsphase eine erste Einschätzung der Systemkompatibilität zu formulieren. Dies umfasst die Erfüllung geltender Kraftstoffspezifikationen, die Beurteilung bezüglich ihrer Materialverträglichkeit, Performance und Emissionsverhalten sowie die Einordnung hinsichtlich bestehender nationaler und internationaler Regularien (z.B. RED II, BImSchG).

Die Ergebnisse der umfangreichen, iterativen und im engen Austausch mit den Forschungsprojekten der »Energiewende im Verkehr«-Initiative und NAMOSYN durchgeführten Evaluierung der Kraftstoffe wurden in Form kraftstoffspezifischer Fact Sheets aufbereitet und werden im Folgenden präsentiert.

Alle Autorinnen und Autoren wünschen Ihnen, liebe Leserinnen und Leser, eine spannende Lektüre. Wir hoffen, Ihnen mit den hier vorgestellten Fact Sheets einen guten Überblick über den aktuellen Stand der Systemkompatibilität synthetischer Kraftstoffe und spannenden Stoff für weiterführende Diskussionen und Rückfragen zur Verfügung stellen zu können.

JENS ARTZ

PHILIP RUFF

Autorinnen und Autoren



Jens Artz

DECHEMA Gesellschaft für
Chemische Technik und Biotechnologie e.V.

Jens.Artz@dechema.de

Jens Artz ist wissenschaftlicher Mitarbeiter im Fachbereich »Energie und Klima« der Forschungs- und Projektkoordination des DECHEMA e.V. Als Senior Advisor E-Fuels & E-Chemicals betreut er derzeit verschiedene (inter-)nationale Forschungsvorhaben mit Schwerpunkt auf Wasserstoff und Power-to-X Produkten, darunter u.a. »NAMOSYN – Nachhaltige Mobilität durch synthetische Kraftstoffe« sowie »NormAKraft – Normkonformität alternativer Kraftstoffe«.



Sebastian Feldhoff

OWI Science for Fuels gGmbH

S.Feldhoff@owi-aachen.de

Sebastian Feldhoff ist angestellt als Projekt-Ingenieur bei der OWI Science for Fuels gGmbH und leitet dort seit 2017 den Forschungsbereich Fuels and Lubricants. Schwerpunkte seiner über 10-jährigen Forschungstätigkeit am OWI sind chemisch-physikalische Eigenschaften flüssiger Energieträger und deren Anwendung in technischen Systemen. Sebastian Feldhoff ist Mitglied im ProcessNet-Arbeitsausschuss Alternative flüssige und gasförmige Kraft- und Brennstoffe.



Marina Braun-Unkhoff

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V.
(DLR), Institut für Verbrennungstechnik

Marina.Braun-Unkhoff@dlr.de

Marina Braun-Unkhoff ist Wissenschaftliche Mitarbeiterin. Schwerpunkte ihrer langjährigen Arbeiten in zahlreichen nationalen und internationalen Projekten sind Untersuchungen zur Verbrennung und zum Schadstoffverhalten von gasförmigen und flüssigen Brenn-, Kraft- und Treibstoffen, mit einem Fokus auf alternative und nachhaltige. Hierfür wurde sie zum Fellow des Combustion Institutes ernannt.



Jürgen Fischer

DGMK Deutsche Wissenschaftliche Gesellschaft
für nachhaltige Energieträger, Mobilität und
Kohlenstoffkreisläufe e.V.

Juergen.Fischer@fam-hamburg.de

Jürgen Fischer leitet die von der DGMK e.V. geführte Geschäftsstelle des FAM (Fachausschuss für Mineralöl- und Brennstoffnormung in DIN) und ist damit für die Koordination der Normung in diesem Produktbereich verantwortlich. Zum Arbeitsbereich des FAM gehört die Erarbeitung von Anforderungsnormen und Prüfmethode für Kraft-, Brenn- und Schmierstoffe, zu denen auch alternative Produkte wie Wasserstoff, E-Fuels und biostämmige Varianten gehören. Für die DGMK arbeitet Jürgen Fischer im Projekt NormAKraft mit.



Simon Eiden

TEC4FUELS GmbH

Simon.Eiden@tec4fuels.com

Simon Eiden ist Manager der Business Unit Testing bei der Tec4Fuels GmbH, einem Kompetenzzentrum für konventionelle und alternative Brenn-, Kraft-, Treib- und Schmierstoffe (Fuels) und deren Anwendung in bestehenden und neuen Technologien. Der gelernte Biotechnologe erbringt forschungsnahen Dienstleistungen im Bereich der flüssigen Kohlenwasserstoffe und führt Forschungsprojekte durch, an denen TEC4FUELS beteiligt ist, wie zum Beispiel im Projekt NormAKraft.



Kati Görsch

DBFZ Deutsches Biomasseforschungszentrum
gemeinnützige GmbH

Kati.Goersch@dbfz.de

Kati Görsch ist Arbeitsgruppenleiterin der AG »Kraftstoffe und Motoren« im Bereich Bioraffinerien am Deutschen Biomasseforschungszentrum. Mit dem Hintergrund des Umweltchemiestudiums bringt sie sich in Vorhaben mit Bezug zu Kraftstoffen vor allem chemisch-analytisch ein und ist Mitglied im Normenausschuss »Anforderungen an flüssige Kraftstoffe«.



Klaus Lucka

TEC4FUELS GmbH

Klaus.Lucka@tec4fuels.com

Klaus Lucka ist Geschäftsführender Gesellschafter der TEC4FUELS GmbH, einem Kompetenzzentrum für konventionelle und alternative Brenn-, Kraft-, Treib- und Schmierstoffe (Fuels) und deren Anwendung in bestehenden und neuen Technologien. Klaus Lucka bringt seine Expertise zur Herstellung und Anwendung alternativer und konventioneller Brenn- und Kraftstoffe und Trends in der Mineralölwirtschaft in Arbeitskreise Gremien und Forschungsprojekte verschiedener Institutionen ein, so auch im Projekt NormAKraft.



Sandra Richter

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR), Institut für Verbrennungstechnik

Sandra.Richter@dlr.de

Sandra Richter ist Wissenschaftlerin am DLR-Institut für Verbrennungstechnik in Stuttgart und arbeitet in der Abteilung Chemische Kinetik und Analytik. Ihr Arbeitsgebiet liegt zum einem in der experimentellen Untersuchung von Verbrennungseigenschaften alternativer Brenn-, Kraft- und Treibstoffe. Darüber hinaus befasst sie sich im Projekt BEniVer mit der Anwendung strombasierter Kraftstoffe.



Philip Ruff

DECHEMA Gesellschaft für Chemische Technik und Biotechnologie e.V.

Philip.Ruff@dechema.de

Philip Ruff hat in Darmstadt Chemie studiert und anschließend promoviert. Seit 2019 ist er bei der DECHEMA als wissenschaftlicher Mitarbeiter und Projektmanager tätig. Im Fachbereich Energie und Klima arbeitet er in mehreren Projekten mit den Schwerpunkten grüner Wasserstoff und Power-to-X-Technologien.



Jörg Schröder

DBFZ Deutsches Biomasseforschungszentrum gemeinnützige GmbH

Joerg.Schroeder@dbfz.de

Jörg Schröder ist wissenschaftlicher Mitarbeiter im Bereich Bioraffinerien des Deutschen Biomasseforschungszentrums. Sein Aufgabenbereich umfasst die technische Bewertung beim Umgang mit erneuerbaren Brenn-, Kraft- und Treibstoffen sowie deren Anwendung in Verbrennungskraftmaschinen. Jörg Schröder bringt seine Expertise in verschiedenen (inter-)nationalen Projekten und Gremien ein, so auch im Projekt NormAKraft.



Uta Weiß

Gesellschaft für Mineralölanalytik und Qualitätsmanagement mbH + Co.KG (GMA)

Uta.Weiss@gma-qm.de

Uta Weiß ist Geschäftsführerin der GMA. Die GMA betreibt ein eigenes akkreditiertes Kraft- und Brennstofflabor und befasst sich mit allen Themen des Qualitätsmanagements. Ferner ist die GMA in den deutschen und europäischen Normungsgremien aktiv. Uta Weiß hat Verfahrenstechnik studiert und arbeitet neben ihrem Tagesgeschäft zurzeit an Projekten und Studien zur Energiewende mit. Darunter sind auch einige Projekte, die sich mit synthetischen Kraftstoffen beschäftigen. Dies beinhaltet neben technischen Fragestellungen auch die legislativen Themen.

Beteiligte Institutionen

DBFZ Deutsches Biomasseforschungszentrum gemeinnützige GmbH (DBFZ)

DECHEMA Gesellschaft für Chemische Technik und Biotechnologie e.V. (DECHEMA)

Deutsche Wissenschaftliche Gesellschaft für Erdöl, Erdgas und Kohle e.V. Fachausschuss Mineralöl- und Brennstoffnormung (DGMK-FAM)

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. Institut für Verbrennungstechnik (DLR)

GMA Gesellschaft für Mineralöl-Analytik und Qualitätsmanagement mbH + Co. KG (GMA)

OWI Science for Fuels gGmbH (OWI)

TEC4FUELS GmbH (Tec4Fuels)

Kurzfassung

Die Bundesrepublik Deutschland definierte mit der Novellierung des Bundes-Klimaschutzgesetz (KSG) im Jahr 2021 seine Klimaschutzziele neu. So sollen die Treibhausgasemissionen innerhalb Deutschlands bis zum Jahr 2030 um mindestens 65 % gegenüber dem Referenzjahr 1990 reduziert und bis spätestens 2045 Netto-Treibhausneutralität erreicht werden. Diese Zielvorgaben setzen insbesondere den Verkehr kurzfristig, aber auch langfristig unter Zugzwang. Denn hier wurden 2021 nur gut 10 % an Treibhausgasemissionen gegenüber 1990 eingespart. Obwohl die wichtigsten Ansatzpunkte für eine künftige nachhaltige Mobilität **Verkehr vermeiden, Verkehr verlagern und Verkehr verbessern** bekannt sind, gestaltet sich deren Umsetzung als schwierig. Deswegen muss jeder Verkehr, der sich nicht vermeiden lässt, künftig effizient und nachhaltig ermöglicht werden. Die Stärkung von Bus, Bahn und Radverkehr genauso wie die Elektrifizierung des Verkehrs sind hierbei wichtige Elemente. Zusätzlich müssen alle schwer elektrifizierbaren Fahrzeuge und Bestandsfahrzeuge mit ökologisch nachhaltigen alternativen Kraftstoffen (auch Treibstoffen) betrieben werden, um die Ziele des Klimaschutzgesetzes erreichen zu können.

Gegenwärtig sind bereits erste alternative Kraftstoffe im Markt etabliert, weitere Optionen befinden sich noch in der Entwicklung. Je höher sich die Systemkompatibilität dieser Kraftstoffe gestaltet, desto größer sind die Chancen sich perspektivisch als Alternative im Markt zu etablieren und einen Beitrag zur Energiewende im Verkehr zu leisten.

Die hier dargestellten Fact Sheets zeigen die Systemkompatibilität aktuell in der Entwicklung befindlicher, synthetischer (strombasierter) Kraftstoffe auf, welche spezifisch anhand des Status quo zu

- › REACH-Registrierung,
- › Normung,
- › Richtlinien und Verordnungen,
- › Materialverträglichkeit,
- › Performance und
- › Emissionen

im Projekt NormAKraft erarbeitet wurden. Als Ergebnis stehen dazu Fact Sheets zu den synthetischen Alternativen für die klassischen flüssigen Kraftstoffe Diesel (**Fischer-Tropsch-Diesel**), Benzin (**Methanol-to-Gasoline**) und Kerosin (**synthetisches paraffinisches Kerosin**), für die sauerstoffhaltigen Kraftstoffstoffe **Methanol, Dimethylether, Oxymethylenether, Dimethylcarbonat** und **Methylformiat** und für die gasförmigen Kraftstoffe **Wasserstoff, Methan** und **Hythan** (Methan-Wasserstoff-Gemisch) sowie eine Kurzübersicht zu Ammoniak als Kraftstoff zur Verfügung.

Mit entsprechenden Produktionskapazitäten könnten sich vor allem synthetische Kraftstoffalternativen, welche konventionelle Kraftstoffe mit hohen Anteilen oder vollständig substituieren, schnell im Markt etablieren. Vor allem die synthetischen Alternativen zu Diesel (Fischer-Tropsch-Diesel), Benzin (Methanol-to-Gasoline) und Kerosin (Fischer-Tropsch-Kerosin) sowie die Gase Wasserstoff und Methan sind hier zu nennen. Diese Optionen verfügen bereits heute über eine REACH-Registrierung und Normung als Kraftstoff sowie sind deren Materialverträglichkeit, Performance und Emissionsverhalten am Fahrzeug bekannt. Erneuerbarer Wasserstoff und erneuerbares Methan sind gegenwärtig in Deutschland die einzigen Optionen, welche als vollständige Substitute eingesetzt werden können. Einzig der regulatorische Rahmen ist für die synthetischen Kraftstoffe, welche aus erneuerbarem Strom erzeugt werden, noch nicht vollständig gegeben und verhindert ein besseres Business-Case für Produzenten und Investoren.

Die sauerstoffhaltigen Kraftstoffe weisen vor allem Vorteile im Emissionsverhalten gegenüber den konventionellen Kraftstoffen auf, in dem beispielsweise bei der Anwendung als Reinkraftstoff einzelne Schadstoffe im Motorenabgas fast vollständig fehlen. Gleichzeitig besteht bei diesen Optionen teilweise noch erheblicher Forschungs- und Entwicklungsbedarf bezüglich deren Materialverträglichkeit und bei der Auslegung derer Verbrennungskonzepte. Insbesondere bei den Bestandsfahrzeugen werden diese Aspekte als herausfordernd bewertet. Zusätzlich fehlt bei den betrachteten sauerstoffhaltigen Optionen die Normung als Kraftstoff auf europäischer Ebene – in Deutschland sind für Methanol, Dimethylether und Oxymethylenether erste Normungsarbeiten bereits erfolgt bzw. erfolgen gegenwärtig.

Zusammenfassend bleibt festzuhalten, dass sich erneuerbare Kraftstoffe trotz bestehender Systemkompatibilität ohne einen definierten regulatorischen Rahmen im Markt nur schwer etablieren werden. Im Fall der strombasierten Kraftstoffe müssen auf europäischer Ebene vor allem die Rahmenbedingungen für die Bereitstellung des erneuerbaren Stroms (Zusätzlichkeitsgebot) ausgearbeitet und die Normung einzelner Optionen wie Methanol, Oxymethylenether oder Ammoniak vorangetrieben werden. Im konkreten Fall von synthetischen Dieselmotoren steht zusätzlich in Deutschland die Möglichkeit des Inverkehrbringens als Reinkraftstoff noch aus.

INHALT



| | |
|---|----|
| Vorwort | 4 |
| Autorinnen und Autoren | 6 |
| Kurzfassung | 8 |
| Inhaltsverzeichnis | 11 |
| 1 Hintergrund, Zielsetzung und methodischer Ansatz | |
| 1.1 Hintergrund der Analyse | |
| 1.1.1 Alternative, synthetische und nachhaltige Kraftstoffe | 13 |
| 1.1.2 Anforderungen für eine erfolgreiche Markteinführung synthetischer Kraftstoffe | 20 |
| 1.2 Zielsetzung und methodischer Ansatz | 30 |
| 2 Fact Sheets alternativer Kraftstoffe | |
| 2.1 Synthetische Alternativen für klassische Kraftstoffe (Kohlenwasserstoffe) | |
| 2.1.1 Synthetischer Diesel (Fischer-Tropsch) | 33 |
| 2.1.2 Synthetisches Benzin (Methanol-to-Gasoline) | 37 |
| 2.1.2 Synthetische paraffinische Kerosine / Sustainable Aviation Fuel (SAF) | 41 |
| 2.2 Sauerstoffhaltige Kraftstoffe (Oxygenate) | |
| 2.2.1 Methanol | 47 |
| 2.2.2 Dimethylether (DME) | 50 |
| 2.2.3 Oxymethylenether (OME) | 53 |
| 2.2.4 Dimethylcarbonat und Methylformiat (DMC/MeFo) | 57 |
| 2.3 Gasförmige Kraftstoffe (Methan und Wasserstoff) | |
| 2.3.1 Wasserstoff | 59 |
| 2.3.2 Methan | 63 |
| 2.3.3 Hythan (Methan-Wasserstoff-Gemisch) | 66 |
| 2.3.4 Kurzübersicht: Ammoniak in der Schifffahrt | 69 |
| 3 Ausblick | 72 |
| 4 Appendix | |
| REACH-Registrierungen | 77 |
| Kraftstoffnormen | 78 |
| Abkürzungsverzeichnis | 80 |



HINTERGRUND, ZIELSETZUNG UND METHODISCHER ANSATZ

1.1 Hintergrund der Analyse

1.1.1 Alternative, synthetische und nachhaltige Kraftstoffe

Der Verkehrssektor in Deutschland mit seinen unterschiedlichen Verkehrsträgern im Straßen-, Luft- und Schiffsverkehr wird aktuell mit über 94 % des Energieverbrauchs durch die Verbrennung von fossilen, mineralölbasierten Kraftstoffen dominiert. Der Straßenverkehr bildet hierbei den größten Anteil am Energiebedarf, welcher im Wesentlichen durch den Einsatz von Otto- und Dieselmotoren gedeckt wird. Laut Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle wurden im Jahr 2020 – trotz der Auswirkungen der weltweiten Corona-Pandemie – insgesamt rund 16,3 Mio. t Ottokraftstoff (-8,9 % zum Vorjahr) und 35,1 Mio. t Dieselmotoren (-7,1 % zum Vorjahr) fossilen Ursprungs in Deutschland verbraucht.^{1,2} Im Jahr 2021 stieg der Inlandsabsatz für Ottokraftstoffe erneut leicht an (rund 16,4 Mio. t) und blieb für Dieselmotoren nahezu konstant (35,0 Mio. t).³ Selbst unter Einhaltung der politischen Zielsetzungen, bis 2030 – also innerhalb der nächsten acht Jahre – ca. 15 Mio. elektrisch betriebene Pkw auf Deutschlands Straßen zu bringen⁴, wird auch 2030 noch ein substantieller Bestand von etwa 30 Mio. Fahrzeugen allein im Pkw-Segment durch flüssige oder gasförmige Kraftstoffe angetrieben. Hinzu kommen weite Teile des Güter- und Schwerlastverkehrs sowie die Schiff- und Luftfahrt, deren direkte Elektrifizierung (insbesondere auf Langstrecken) bislang nur begrenzt möglich ist. Diese Verkehrsträger werden somit auch langfristig auf die hohe Energiedichte von Kraftstoffen angewiesen sein. Ein vollständiger Verzicht auf Kraftstoffe im Verkehr ist daher nur schwer vorstellbar.

Allerdings ist der Einsatz fossiler Kraftstoffe nicht nachhaltig und zudem gesundheitsschädlich. Bei ihrer Verbrennung entstehen Kohlenstoffdioxid (CO₂) und Wasser sowie gesundheits- und umweltgefährdende Luftschadstoffe, z.B. Partikelemissionen, Stickoxide (NO_x), Lachgas (N₂O), Schwefeloxide (SO_x) unverbrannte Kohlenwasserstoffe, Kohlenstoffmonoxid (CO) und Ammoniak (NH₃). Einige dieser Emissionen sind zusätzlich klimaschädlich, allen voran die Gase Kohlenstoffdioxid, Lachgas und Methan.

Die Erschließung und Nutzung der meist internationalen Rohöl- und Erdgasvorkommen gehen mit teils herausfordernden geopolitischen Abhängigkeiten einher. Dies zeigte sich zuletzt sehr deutlich im Zuge des russischen Angriffskriegs auf die Ukraine und der daraus resultierenden Energiekrise in Europa. Um eine zukünftige Nutzung von Verbrennungskraftmaschinen im Verkehr möglichst nachhaltig zu gestalten, werden im Rahmen einer Vielzahl (inter-)nationaler Projekte und Kooperationen alternative, synthetische und nachhaltige Kraftstoffe entwickelt und hinsichtlich ihrer ökologischen, ökonomischen sowie sozialen Aspekte analysiert.

¹ BAFA: Amtliche Mineralölstatistik Dezember 2019, www.bafa.de (2019) (zuletzt aufgerufen am 24.11.2022)

² BAFA: Amtliche Mineralölstatistik Dezember 2020, www.bafa.de (2020) (zuletzt aufgerufen am 24.11.2022)

³ BAFA: Amtliche Mineralölstatistik Dezember 2021, www.bafa.de (2021) (zuletzt aufgerufen am 24.11.2022)

⁴ Bundesregierung: Koalitionsvertrag 2021 zwischen SPD, Bündnis 90/Die Grünen und FDP, www.bundesregierung.de (Koalitionsvertrag 2021) (zuletzt aufgerufen am 24.11.2022)

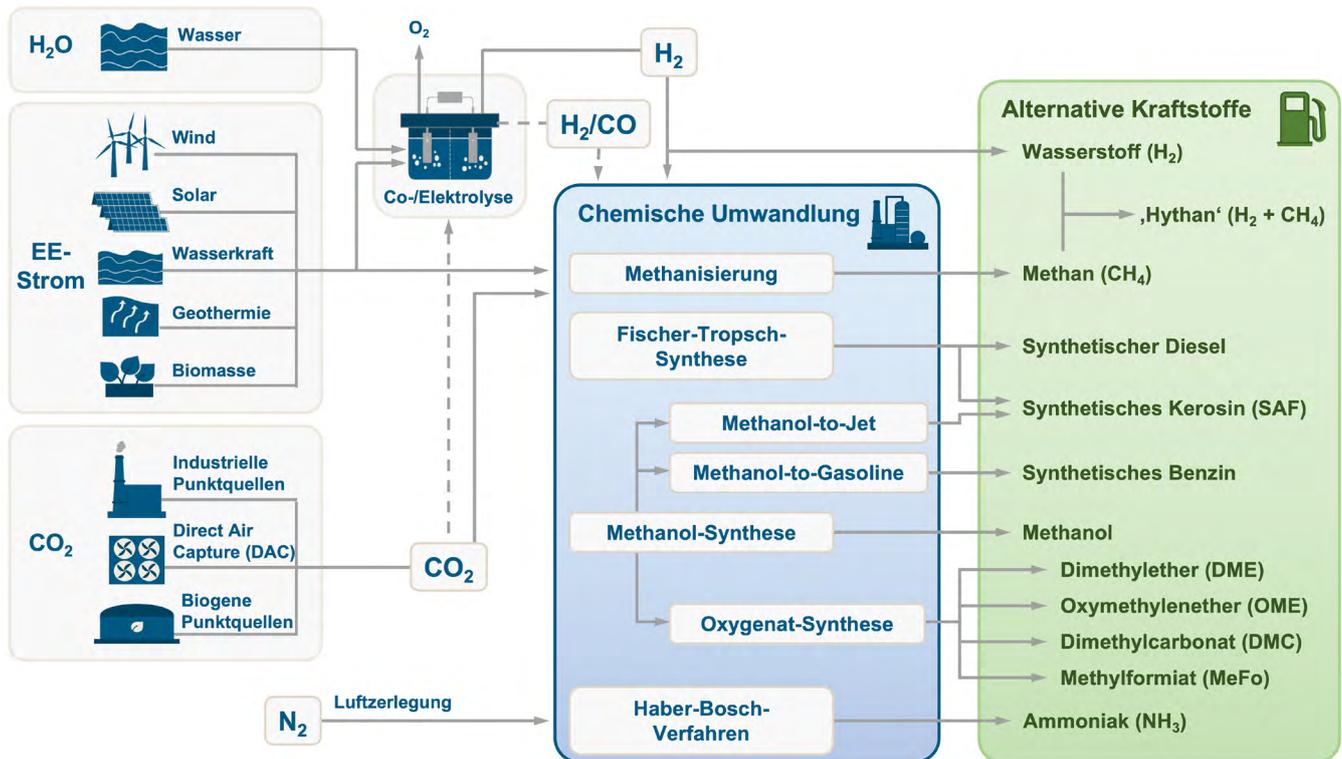


Abbildung 1
Übersichtsschema zu
PtX-Erzeugungspfaden
für den breiten Einsatz
in diversen Verkehrsträgern

Im Kern dieser alternativen Kraftstoff-Erzeugungspfade stehen die sogenannten »Power-to-X«-Technologien (siehe [Abbildung 1](#)) und biogene Verfahren.⁵ Die Bezeichnung »Power-to-X« (PtX) beinhaltet die Umwandlung von Wasser, Kohlenstoffmonoxid oder Kohlenstoffdioxid und/oder Stickstoff mit Hilfe von elektrischem Strom in diverse Energieträger und Chemikalien. Im Falle von »Power-to-Gas« (PtG) entstehen dabei Gase wie Wasserstoff (H_2), Methan oder auch Dimethylether und Ammoniak, über »Power-to-Liquid« (PtL) werden flüssige Kohlenwasserstoffe und verschiedene Oxygenate (sauerstoffreiche Verbindungen wie z.B. Alkohole, Ester und länger-kettige Ether) zugänglich. Wird hierbei Strom aus regenerativen Quellen wie Wind-, Solar- und Wasserkraft oder auch Geothermie und Biomasse erzeugt, lassen sich die PtX-Produkte ökologisch nachhaltig erzeugen. Der benötigte Kohlenstoff kann hierfür aus sogenannten industriellen Punktquellen (Abgase aus großindustriellen Prozessen), biogenen (Punkt-)Quellen oder aus der Umgebungsluft (Direct Air Capture, DAC) gewonnen werden. Um dem Anspruch von CO_2 -Neutralität zu entsprechen, sollte das eingesetzte CO_2 langfristig rein aus nachhaltigen Quellen stammen. Diese nachhaltig erzeugten PtX-Produkte können in verschiedenen Anwendungsbereichen – insbesondere auch im Verkehrssektor in Form nachhaltig erzeugter synthetischer Kraftstoffe – zu einer deutlichen Minderung von Treibhausgasemissionen beitragen.

⁵ Biogene Kraftstoffe waren nicht Bestandteil der Förderinitiative »Energiewende im Verkehr« und wurden daher im Rahmen dieser Studie nicht vertieft analysiert. Einen guten Überblick über diese Alternativen bietet Schröder, J.; Naumann, K. (Hrsg.) (2022): Monitoring erneuerbarer Energien im Verkehr. Leipzig: DBFZ. 340 S. ISBN: 978-3-946629-82-5. DOI: 10.48480/19nz-0322, <https://www.dbfz.de/report-44>

Am Anfang der Wertschöpfungskette aller alternativen Kraftstoffe steht dabei **Wasserstoff (H₂)**. Großtechnisch wird Wasserstoff heute größtenteils mittels Dampfreformierung aus Erdgas sowie Vergasung von Schweröl (partielle Oxidation) gewonnen, was hohe CO₂-Emissionen verursacht. Nachhaltig und damit so klimaschonend wie möglich kann als »grün« bezeichneter Wasserstoff durch Elektrolyse von Wasser mit Strom aus erneuerbaren Quellen erzeugt werden. Die drei bekanntesten Verfahren sind die alkalische Elektrolyse (AEL), die Protonenaustauschmembran-Elektrolyse (PEMEL) und die Festoxid-Elektrolyse (SOEL). Etabliert, jedoch mit geringen verfügbaren Kapazitäten, sind AEL und PEMEL. Alternativ-Routen zur Erzeugung von erneuerbarem Wasserstoff, wie Dampfreformierung von Biogas, thermochemische Vergasung von Biomasse, Abfällen und Reststoffen, Plasmalyse oder solarthermische Prozesse, befinden sich derzeit in der Entwicklung.⁶

Dieser nachhaltig erzeugte Wasserstoff kann entweder direkt in Fahrzeugen mit Wasserstoffverbrennungsmotor oder Brennstoffzelle verwendet oder aber über PtX-Verfahren in unterschiedliche synthetische Kraftstoffe umgewandelt werden. Eine mögliche Zwischenstufe für die chemische Umwandlung stellt hierbei das sogenannte Synthesegas, eine Mischung aus Wasserstoff und Kohlenstoffmonoxid (H₂ / CO), dar. Dieses Synthesegas wird u.a. über die sogenannte reverse Wassergas-Shift-Reaktion, über Co-Elektrolyse von CO₂ und Wasser oder durch Vergasung von Biomasse erzeugt.

Erneuerbares **Methan (CH₄)** lässt sich über die katalytische oder biologische Methanisierung von Synthesegas und/oder CO₂, sowie die anaerobe Fermentation (Vergärung) von Biomasse bereitstellen. Die katalytische Methanisierung von CO₂ mit H₂ nach dem Sabatier-Prozess findet an einem Katalysator statt. Im Gegensatz dazu erfolgt bei der biologischen Methanisierung die Umwandlung von CO₂ und H₂ zu Methan durch Mikroorganismen und bei der anaeroben Fermentation in Folge des biologischen Abbaus organischer Ressourcen durch Mikroorganismen zu einem Rohbiogas, überwiegend bestehend aus Methan und Kohlenstoffdioxid. Die anaerobe Fermentation ist eine etablierte Technologie, alle weiteren Verfahren befinden sich noch in der Entwicklung.⁷

Komprimiert (Compressed Natural Gas, CNG) oder verflüssigt (Liquefied Natural Gas, LNG) ist synthetisches Methan mit bestehenden Erdgasinfrastrukturen vollständig kompatibel und gleichermaßen im straßengebundenen Individual- und Güterverkehr wie auch in der Schifffahrt und zur Stromerzeugung in Gaskraftwerken einsetzbar. Neben der Verwendung als Kraft- und Brennstoff dient Methan als Basischemikalie für diverse technische Synthesen.

⁶ Schröder, J.; Naumann, K. (Hrsg.) (2022): Monitoring erneuerbarer Energien im Verkehr. Leipzig: DBFZ. 340 S. ISBN: 978-3-946629-82-5. DOI: 10.48480/19nz-0322, <https://www.dbfz.de/report-44>

⁷ van Basshuysen, R. (Hrsg.) (2015): Erdgas und erneuerbares Methan für den Fahrzeugantrieb. ISBN: 978-3-658-07159-2

Als **Hythan** werden Gemische aus Wasserstoff (aus dem Englischen **Hydrogen**) und **Methan** beschrieben, typischerweise mit einem Wasserstoffanteil von etwa 10 bis 30 Vol.%. Hythan könnte als komprimierter gasförmiger Kraftstoff spezielle Anwendungen wie beispielsweise in kommunalen Betrieben oder stationäre Großmotoren bedienen. Die Mischung beider Gase ist Stand der Technik und lässt sich auf die nachhaltig produzierten Varianten ohne technische Anpassung übertragen.

Methanol ist mit rund 100 Mio. t Jahresproduktion (Stand 2020) eine der meisthergestellten organischen Chemikalien und dient für viele Folgeprodukte als Basischemikalie.⁸ Die technische Methanolherstellung erfolgt hauptsächlich katalytisch aus Kohlenstoffmonoxid und Wasserstoff fossilen Ursprungs. Wird Synthesegas zukünftig auf Basis regenerativ erzeugten Wasserstoffs und nachhaltiger C-Quellen produziert, lässt sich auch die Methanolsynthese ohne großen technologischen Anpassungsbedarf nachhaltig gestalten. Alternative Routen gehen von der direkten Hydrierung von CO₂ mit erneuerbarem Wasserstoff aus. Als Energieträger im Verkehr wird Methanol in vielfältigen Varianten entweder direkt als Kraftstoff oder Kraftstoffzusatz verwendet. Vor allem in der Schifffahrt wird Methanol als eine vielversprechende Option diskutiert.

Langkettige und damit flüssige Kohlenwasserstoffe lassen sich über verschiedene PtX-Technologien wie die Fischer-Tropsch-Synthese und Methanolsynthese inklusive der darauf aufbauenden Folgesynthesen erzeugen.⁹ Bei der Fischer-Tropsch-Synthese entsteht aus Synthesegas ein breites Spektrum an Produkten, die neben paraffinischem Diesel u.a. auch zu Rohbenzin (Naphtha), Kerosin und Wachsen weiterverarbeitet werden können. Die Kettenlänge der paraffinischen, überwiegend unverzweigten Kohlenwasserstoffe reicht dabei von Methan (C₁) bis zu festen Wachsen (C₂₀-Ketten und länger). Der dabei entstehende **synthetische, strombasierte Diesel** kann dem fossilen Mineralöldiesel problemlos beigemischt werden oder ihn gänzlich ersetzen.

Neben paraffinischem Diesel lassen sich über das Fischer-Tropsch-Verfahren (FT-Verfahren) auch synthetisches Benzin und **paraffinisches Kerosin** erzeugen.¹⁰ Insbesondere letzteres ist in der Debatte um die Defossilisierung des Flugverkehrs, bei welchem Kerosin insbesondere für Langstreckenflüge als alternativlos gilt, in den Fokus vieler Forschungs- und Demonstrationsvorhaben gerückt. Neben dem Fischer-Tropsch-Verfahren sind die geläufigsten Herstellungswege für nachhaltiges Kerosin (**Sustainable Aviation Fuel, SAF**) noch das HEFA- und das Alcohol-to-Jet-Verfahren (AtJ). HEFA steht hierbei für Hydroprocessed Esters and Fatty Acids, was den Syntheseweg im Grunde beschreibt: Es werden natürliche Ester und Fettsäuren hydriert. Die Herstellung von HEFA-Kerosin wie auch das FT-Verfahren¹¹ sind bereits etablierte Prozesse, die in großtechnischem Maßstab angewendet werden.

⁸ Gelsenchem: Methanol (MeOH), www.gelsenchem.de (zuletzt aufgerufen am 07.12.2022)

⁹ TU Bergakademie Freiberg (2017): Studie zur Herstellung alternativer flüssiger Kraft- und Brennstoffe, www.tu-freiberg.de

¹⁰ TU Bergakademie Freiberg, DGMK (Hrsg.) (2021): Forschungsbericht 815 - Herstellung treibhausgasreduzierter bzw. treibhausgasneutraler gasförmiger und flüssiger Energieträger und Brennstoffe, ISBN 978-3-947716-29-6, https://dgmk.de/app/uploads/2021/08/DGMK_815_veroeffentlicht_web.pdf.

¹¹ Bislang nur auf Basis fossiler Rohstoffe im industriellen Maßstab verfügbar.

AtJ-Kerosin wird über die Synthese aus kurzkettigen Alkoholen gewonnen, wobei gegenwärtig nur Ethanol und Isobutanol zugelassen sind. Die Alkohole stammen dabei aus biotechnologischen Prozessen auf der Basis von Kohlenhydraten und Lignocellulose sowie Synthese- oder Industrieabgasen. Erste Anlagen nach diesem AtJ-Verfahren befinden sich im Aufbau. Eine weitere Variante des AtJ-Verfahrens stellt auch die Methanol-to-Jet-Route (MtJ) dar, welche ebenfalls innerhalb der Förderinitiative »Energiewende im Verkehr« betrachtet wird. Weitere Verfahren zur Herstellung von synthetischem paraffinischem Kerosin basieren auf der direkten Hydrierung von organischen Ausgangsmaterialien wie Lignocellulose, Fetten und Ölen. Neben der Gewinnung von Alkoholen können durch biotechnologische Verfahren auch eigens für die SAF-Produktion benötigte Kohlenwasserstoffe, Fettsäuren und Fettsäureester bereitgestellt oder zucker- und stärkehaltige Substrate für die Herstellung von sogenanntem SIP-Kerosin (Synthetic Isoparaffins, auch Farnesan genannt) genutzt werden.

Neben der Fischer-Tropsch-Route kann **synthetisches Benzin** über das Methanol-to-Gasoline Verfahren (MtG) erzeugt werden. Der erste MtG-Prozess wurde von Exxon (heute ExxonMobil) in den 1970er Jahren entwickelt und beruht auf der katalytischen Umsetzung von Methanol zunächst zu Dimethylether. Anschließend erfolgt die Reaktion zu leichten Oligomeren, höheren Oligomeren und final zu Paraffinen, Aromaten und Naphthenen. Neuere Herstellungsverfahren erfolgen über die Synthesegas-Methanol-Benzin-Route: Aus Synthesegas wird in einem ersten Schritt Methanol erzeugt, aus welchem im zweiten Schritt katalytisch ein Ottokraftstoff synthetisiert wird. Je nach gewünschter Ottokraftstoffqualität kann die Produktqualität mittels Destillation gewährleistet werden. Dabei stehen vor allem der Anteil von höheren Aromaten und der Siedebereich im Fokus.¹²

Methanolbasierte sauerstoffhaltige Folgeprodukte, die Anwendung im Verkehrssektor finden könnten, fallen (neben anderen sauerstoffhaltigen Verbindungen) in die Klasse der sogenannten **Oxygenate**. Die Anwendung dieser Stoffklasse im Verbrennungsprozess birgt Potenzial zur drastischen Reduzierung von Rußbildung bei gleichzeitiger Möglichkeit der Reduzierung von Stickoxid-Emissionen (so genanntes Ruß-NO_x trade-off).¹³ Und auch hier gilt, dass die erzeugten Kraftstoffe klimaneutral bereitgestellt werden können, sofern das Methanol nachhaltig auf Basis erneuerbarer Rohstoffe produziert wurde.

Die Synthese von **Dimethylether (DME)** erfolgt derzeit üblicherweise durch säurekatalysierte Kondensation von Methanol. Aufgrund seiner hohen Cetanzahl kann DME gut als Dieselsubstitut eingesetzt werden. Die Verflüssigung bei geringem Druck (ca. 5–7 bar) führt zu einem vergleichbaren Handling wie bei LPG.

¹² ExxonMobil: <https://www.exxonmobil-chemical.com/en/catalysts-and-technology-licensing/synthetic-fuels> (zuletzt aufgerufen am 2.3.2023)

¹³ Jacob, E., Stark, M., Härtl, M., Wachtmeister, G. (2019). C1-Oxygenate als zukünftige Kraftstoffe. In: Tschöke, H., Marohn, R. (eds) 11. Tagung Einspritzung und Kraftstoffe 2018. Proceedings. Springer Vieweg, Wiesbaden. DOI: 10.1007/978-3-658-23181-1_2, https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-658-23181-1_2.

Oxymethylenether (OME) können auf Basis verschiedener Prozessabläufe ebenfalls nachhaltig hergestellt werden. Hierbei sind Zwischenprodukte aus zwei Gruppen notwendig: Zum einen werden entweder Dimethoxymethan, Dimethylether oder Methanol benötigt, zum anderen Formaldehyd, Paraformaldehyd oder Trioxan. OME wird sowohl als reiner Kraftstoff als auch als Beimischungskomponente für die Verbrennung in Dieselmotoren untersucht.

Weitere Kraftstoffsubstitute, welche aus den Grundstoffen Methanol und CO hergestellt werden können, sind **Dimethylcarbonat (DMC)** und **Methylformiat (MeFo)**. DMC als Basischemikalie ist aus großtechnischer Herstellung mit einer Reinheit von >99 % verfügbar. Als Carbonsäureester wird Methylformiat im industriellen Maßstab durch Carbonylierung von Methanol mit Kohlenstoffmonoxid hergestellt. Handelsübliches MeFo besitzt einen Reinheitsgrad von ca. 97 % und kann somit bis zu 3 % des Ausgangsstoffes Methanol enthalten. Dadurch erfordert MeFo eine GHS-Einstufung als toxischer und organschädigender Stoff. Großtechnisch ist es durch Erhöhung der Trennleistung der Destillation möglich, den Restmethanolgehalt des MeFo auf unter 0,3 % abzusenken. Sowohl DMC als auch MeFo eignen sich für den Einsatz in einem ottomotorischen Brennverfahren.

Neben den kohlenstoffbasierten Kraftstoffen könnte zukünftig auch aus grünem Wasserstoff und Stickstoff gewonnener **Ammoniak (NH₃)** eine wichtige Rolle als alternativer Kraftstoff in der Schifffahrt einnehmen; neben dem für die Herstellung etablierten Haber-Bosch-Verfahren sind auch neue Verfahren Gegenstand der Forschung für eine nachhaltige Ammoniaksynthese. Bei der vollständigen Verbrennung von Ammoniak entstehen theoretisch nur die Ausgangsrohstoffe Wasser und Stickstoff, und da kein Kohlenstoff vorhanden ist, entfallen CO₂- und andere kohlenstoffbasierte Emissionen vollständig. Allerdings werden bei der Verbrennung Stickoxide gebildet und ebenso ist hier die Entstehung von Lachgas möglich. Bei der Nutzung und Handhabung ist zudem der direkte Schlupf von Ammoniak möglich. Abgasnachbehandlungssysteme sind in der Lage, die genannten Emissionen weitestgehend zu verhindern. Der Einsatz von Ammoniak wird aufgrund der hohen Toxizität und dem damit verbundenen komplexen Handling aber vermutlich nur begrenzt auf den Gütertransport innerhalb der Schifffahrt stattfinden. Sowohl der Einsatz in Verbrennungsmotoren als auch in Brennstoffzellen ist Gegenstand aktueller Forschungsarbeiten.^{14, 15} Vorteilhaft auswirken dürfte sich, dass Ammoniak als Basischemikalie heute bereits bei 220 Mio. t globaler Jahresproduktion (2020) weltweit gehandelt wird.¹⁶ Jedoch müssten die bestehenden Kapazitäten stark ausgebaut werden, um den zusätzlichen Bedarf zu decken. Hinzu kommt, dass auch die Ammoniak-Produktion heute noch nicht auf Basis von erneuerbaren Ressourcen erfolgt.

¹⁴ Cardoso, J. S.; Silva, V.; Rocha, R. C.; Hall, M. J.; Costa, M.; Eusébio, D.: Ammonia as an energy vector: Current and future prospects for lowcarbon fuel applications in internal combustion engines. *Journal of Cleaner Production* 296 (Elsevier) (2021) 126562

¹⁵ Nils de Vries (TUDelft, Thesis): Safe and effective application of ammonia as a marine fuel (2019), <http://resolver.tudelft.nl/uuid:be8cbe0a-28ec-4bd9-8ado-648de04649b8>, (zuletzt aufgerufen am 3.3.2023)

¹⁶ Sven Kohnke (YARA Brunsbüttel): The color of Ammonia, 2. Lausitzer Fachkonferenz, 11.11.2021 (Cottbus & digital), <https://www.klimaschutz-industrie.de/newsroom/news/2-lausitzer-fachkonferenz-klimaneutrale-industrie-2021-erfolgreich-beendet/> (zuletzt aufgerufen am 4.5.2023)

Die zuvor benannten Kraftstoffe werden zudem häufig als **Gemische (sogenannte Blends)** eingesetzt und enthalten neben ihren Hauptkomponenten Zusatzstoffe (sogenannte Additive), welche die Eigenschaften der Gemische auf ihre spezielle Anwendung und in speziellen Fällen (z.B. Kälteeigenschaften, Stabilität) hinsichtlich ihrer Normkonformität optimieren. Außerdem wird bei einer Vielzahl dieser alternativen Kraftstoffe als Annahme vorausgesetzt, dass diese sich als Blend reibungslos in die bestehende Infrastruktur (Fahrzeuge, Tanklager, Tankstellen und Vertriebsstrukturen, etc.) einbinden lassen, also weitgehend mit den vorhandenen Systemen kompatibel sind.

Die Kompatibilität dieser Alternativen ist bisher jedoch nur bei wenigen bereits in der Anwendung befindlichen Produkten analysiert und sichergestellt. Zur Systemkompatibilität gehört dabei eine Reihe regulatorischer und technischer Rahmenbedingungen, wie die Konformität der alternativen Kraftstoffe hinsichtlich existierender Normen, Materialverträglichkeit innerhalb der vorhandenen Infrastrukturen (Lagerung, Transport, Verteilung und Fahrzeuganwendung) und bestehender (inter-)nationaler Richtlinien und Verordnungen. Nur wenn diese Bedingungen ausreichend erfüllt sind, ist eine – zumindest auf technischer Seite – reibungslose Implementierung möglich. Weitergehende Anpassungen sind mit Kosten und Risiken verbunden, die eine frühzeitige Markteinführung alternativer Kraftstoffe verzögern oder sogar ganz verhindern können.

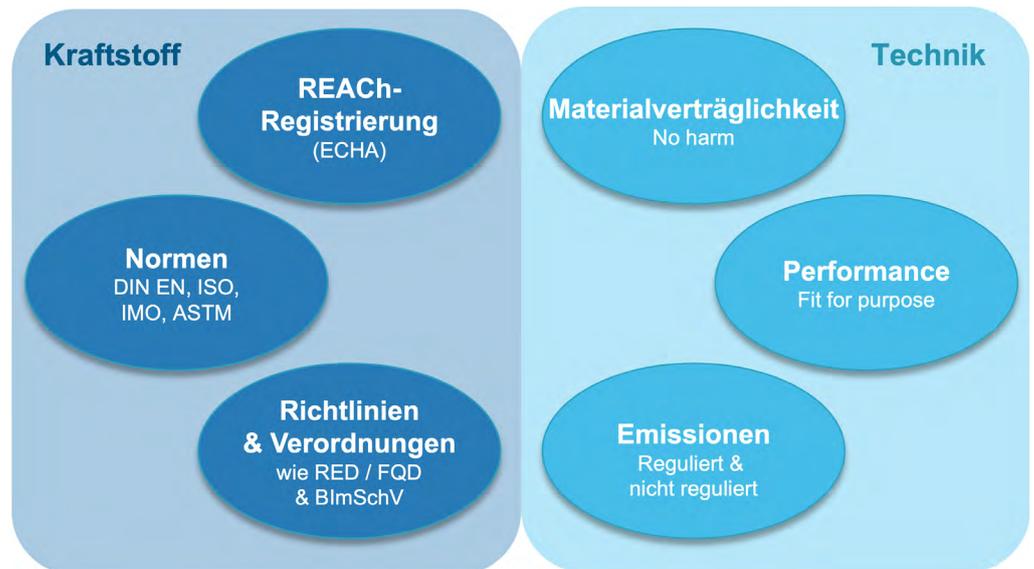


Abbildung 2
Einordnung der Kriterien hinsichtlich Kraftstoff- und Technik-bezogener Anforderungen zur Bewertung der in der »Energiewende im Verkehr« beforschten Kraftstoffe

1.1.2 Anforderungen für eine erfolgreiche Markteinführung synthetischer Kraftstoffe

Die Erfüllung der sechs nachfolgend aufgeführten Kraftstoff- bzw. Technik-bezogenen Anforderungen ist für eine erfolgreiche Markteinführung bei maximalen ökologischen Vorteilen zwingend erforderlich (siehe [Abbildung 2](#)): Besonders relevant sind der jeweilige Status der REACH-Registrierung des Produktes bei der Europäischen Chemikalienagentur ECHA, die Erfüllung der Normkonformität im Hinblick auf nationale und internationale Normen, die Einordnung hinsichtlich bestehender nationaler und internationaler Richtlinien und Verordnungen, die Beurteilung der Materialverträglichkeit (»No Harm«) der alternativen Kraftstoffe gegenüber den in Fahrzeugen und Infrastruktur eingesetzten Materialien, die Bewertung der Performance in der jeweiligen Nutzphase (»Fit for purpose«) sowie die Auswertung kraftstoffspezifischer Emissionen.

Im Folgenden werden diese sechs Anforderungen hinsichtlich ihrer Einordnung beschrieben.

REACH-Registrierung

Seit 2008 regelt die Europäische REACH-Verordnung, welche Anforderungen bei Inverkehrbringung von chemischen Stoffen und Gemischen gestellt werden. Mit wenigen Ausnahmen besteht eine Pflicht zur Registrierung bei der Europäischen Chemikalienagentur (ECHA).¹⁷ Im Zuge dieses Verfahrens müssen umfangreiche physikalisch-chemische, toxikologische und ökotoxikologische Daten erbracht und für eine sichere Handhabung der Chemikalien bewertet werden. Diese Anforderungen gelten für neue Stoffe, Gemische sowie für bekannte Stoffe in neuen Anwendungen bzw. Herstellungspfaden. Der hierbei zum Tragen kommende Grundsatz lautet: »No data – no market«. Ausnahmen bei der Registrierung liegen u.a. für Wasserstoff und Stickstoff sowie Methan aus der Fermentation vor.

Für Stoffe in Mengen von weniger als einer Tonne pro Jahr besteht gemäß der REACH-Verordnung keine Registrierungspflicht.¹⁸ Sofern diese für die wissenschaftliche Forschung und Entwicklung verwendet werden, sind diese zur Förderung von Innovationen außerdem von der Zulassung und den Beschränkungen befreit. Ebenfalls von der Registrierungspflicht ausgenommen sind für einen Zeitraum von fünf Jahren Stoffe in Mengen von einer Tonne, die in der produkt- und verfahrensorientierten Forschung und Entwicklung (product and process orientated research and development, PPORD) verwendet werden. Dies setzt allerdings eine PPORD-Anmeldung bei der ECHA voraus.

Die rechtlichen Anforderungen an den Inverkehrbringer eines Stoffes oder Gemisches im Rahmen der REACH-Verordnung sind sehr komplex und unterscheiden sich maßgeblich von Fall zu Fall, weshalb in der vorliegenden Analyse nicht für jeden Stoff im Detail hierauf eingegangen werden kann. Vielmehr wird eine erste Einschätzung dargestellt, in welchem Status sich die Registrierung des jeweiligen Produktes zum Zeitpunkt der Veröffentlichung der vorliegenden Studie befindet.

Eine Übersicht zu den bereits in der Datenbank der ECHA eingetragenen synthetischen Kraftstoffen befindet sich im Appendix dieser Studie.



¹⁷ ECHA: Eine Agentur der Europäischen Union, www.echa.europa.eu/de (zuletzt aufgerufen am 25.11.2022)

¹⁸ ECHA: PPORD Befreiung, www.echa.europa.eu/de (PPORD-Befreiung), (zuletzt aufgerufen am 25.11.2022)

Normen und Normkonformität

Normung schafft eine gemeinsame Basis für Eigenschaften, die für die Anwendung eines Produktes unter vergleichbaren Bedingungen notwendig sind. Um eine verlässliche Basis für die Konstruktion von Fahrzeug-, Schiffs- und Flugzeugantrieben zu schaffen, sind Kraftstoffe genormt. Die Existenz von Normen ist Voraussetzung für die Markteinführung von Kraftstoffen in Europa. Nicht genormte Kraftstoffe dürfen innerhalb der EU nicht in Verkehr gebracht werden. Die EU-Kommission und die nationalen Normungsgremien (in Deutschland ist das Deutsche Institut für Normung – DIN – zuständig.) arbeiten hier eng mit CEN, dem europäischen Komitee für Normung, zusammen, um die notwendigen Spezifikationen zu erarbeiten. Normen, die von CEN erarbeitet werden, sind innerhalb der CEN-Mitgliedsländer verbindlich. Produkte dürfen nur dann auf nationaler Ebene genormt werden, wenn kein europäischer Standard bzw. kein europäisches Projekt zur Normung existiert.

Die ersten deutschen Kraftstoffnormen für den **straßengebundenen Verkehr** wurden Mitte der 1950er Jahre veröffentlicht, seit 1993 wird die Qualität von Diesel- und Ottokraftstoffen durch europäische Normen festgelegt. Weltweit existieren in den meisten Ländern vergleichbare Anforderungen, die die Eigenschaften von Kraftstoffen festlegen. Diese Normen geben den Fahrzeugherstellern die Möglichkeit, Motoren anhand der Kenndaten auf die gesetzlichen Anforderungen anzupassen.¹⁹ Neue Motorengenerationen können durch die festgeschriebene und definierte Qualität der Kraftstoffe optimiert werden.

Ähnlich verhält es sich bei der Luftfahrt. Aufgrund der sehr hohen Anforderungen von Flugzeugtriebwerken an den Treibstoff sowie der Notwendigkeit, diesen weltweit bei gleichbleibenden Qualitäten beziehen zu können, unterliegt dieser allerdings umfassenden, internationalen Qualitätsbestimmungen gemäß der internationalen Standardisierungsorganisation ASTM International (ursprünglich American Society for Testing and Materials).²⁰ Für den Einsatz in der kommerziellen Luftfahrt muss ein Treibstoff einen Zertifizierungsprozess gemäß ASTM D4054 erfolgreich durchlaufen und kann nur dann als zertifizierter Treibstoff dem Anhang der international gültigen Norm ASTM D7566 hinzugefügt werden. In der ASTM D7566 werden alle zugelassenen synthetischen Treibstoffe aufgelistet. Konventionelles, d.h. das rohölbasierte Kerosin (Jet A-1) ist in der ASTM D1655 beschrieben.

In der **internationalen Schifffahrt** erarbeitet die Internationale Seeschiffahrts-Organisation (IMO, International Maritime Organization) die seerechtlichen Normen und Kodizes.²¹ Die IMO umfasst 175 Staaten und drei assoziierte Mitglieder

¹⁹ DIN FAM:
Fachausschuss Mineralöl-
und Brennstoffnormung,
www.fam-hamburg.de
(zuletzt aufgerufen am
25.11.2022)

²⁰ ASTM International:
Standards Worldwide,
www.astm.org
(zuletzt aufgerufen am
25.11.2022)

²¹ IMO:
International Maritime
Organisation,
www.imo.org
(zuletzt aufgerufen am
25.11.2022)

(chinesische Sonderverwaltungszone Hongkong und Macau sowie die zu Dänemark gehörigen Färöer). Die Bundesrepublik Deutschland ist seit 1959 Mitglied der IMO. Auch hier gilt es, durch festsetzen der seerechtlichen Normen die Schiffssicherheit und Sicherheit in der Seefahrt im Allgemeinen sicherzustellen sowie Umwelt- und Meeresverschmutzung durch die Schifffahrt zu verringern bzw. gänzlich zu vermeiden. Die Anforderungen der IMO an Schifffahrtsbrennstoffe sind derzeit in der internationalen Norm ISO 8217 festgelegt und durch die DIN in Deutschland überführt.

Aktuell werden in verschiedenen Projekten und Förderinitiativen Kraft- und Brennstoffe untersucht, die in einigen Fällen bisher noch nicht im praktischen Einsatz sind und für die auch noch keine einschlägigen Normen existieren. Dieser Umstand wiederum erschwert die Anpassung der Motoren und Triebwerke an die neuartigen Kraftstoffe und verringert u.a. die Bereitschaft der Fahrzeugindustrie deutlich, sich zu engagieren. Die Normung auch neuer Kraftstoffe – zumindest der wesentlichen Parameter – erleichtert zeitgleich auch die Diskussion über Eigenschaften und Performance dieser Produkte. Abhängig vom Status der Projektarbeit ist bereits im Rahmen der laufenden Förderinitiativen und Projekte für die beforschten alternativen Kraftstoffe eine Normung anzustreben. So kann sichergestellt werden, dass die Diskussion über Eigenschaften und Performance von Kraftstoffen zur Vorbereitung einer offiziellen Norm frühzeitig angestoßen werden und ggfs. im Rahmen einer Vornorm (DIN TS = Technische Spezifikation)²² eine einheitliche Datenbasis geschaffen wird.

Normen und Standards tragen somit dazu bei, dass für das Mobilitätssystem der Zukunft innovative Lösungen entwickelt werden können. Im Bereich der Energieträger – insbesondere bei den Kraftstoffen für Verbrennungsmotoren – zeigt sich, dass es notwendig ist, für bereits absehbare Kraftstoffqualitäten die Normung voranzubringen, um diese am Markt etablieren zu können. Zudem existiert sowohl Handlungsbedarf bei der Anpassung bestehender als auch bei der Erarbeitung neuer Standards und Normen. Sollen die definierten Klimaziele bis 2030 bzw. 2045 erreicht werden, ist es erforderlich, über die heute mögliche Beimischung erneuerbarer Kraftstoffe im Rahmen vorhandener Kraftstoffnormen hinauszugehen oder auch gänzlich neue Kraftstoffqualitäten anzubieten.

Eine Übersicht zu existierenden Normen, in denen die jeweiligen synthetischen Kraftstoffe bislang inkl. zulässiger Beimischungsquoten erfasst sind, bzw. in welchem Status der Normung sich einzelne Kraftstoffe zum Zeitpunkt der Veröffentlichung dieser Studie befinden, befindet sich im Appendix.



²² Normprozess innerhalb der Fachausschüsse, im Allgemeinen Vorstufe zu einer regulären DIN Norm.

Regularien und Verordnungen

Die Kraftstoffqualitätsrichtlinie (Fuel Quality Directive, FQD) regelt die Qualität von Otto-, Diesel- und Gasölkraftstoffen, die in der EU in Verkehr gebracht werden dürfen.²³ Sie bezieht sich auf einen festgelegten Satz von Parametern, der für jedes Produkt definiert ist und der sich an den Kraftstoffnormen orientiert – aber nicht alle Parameter der Norm beinhaltet. In Deutschland sind die zugelassenen Kraftstoffe für den straßengebundenen Verkehr in der 10. Verordnung zum Bundes-Immissionsschutz (10. BImSchV) gelistet. Im Gegensatz zur Regelung in vielen anderen EU-Mitgliedsstaaten bezieht sich der Verordnungstext explizit auf die jeweiligen Normen. Die aufgeführten Kraftstoffe müssen alle hier geforderten Parameter einhalten, um in Deutschland in Verkehr gebracht werden zu dürfen, wobei sich die zitierten Normen auf die in der Verordnung angegebene Ausgabe beziehen und damit nicht unbedingt auf die aktuelle Ausgabe der Norm.

Wasserstoff, Erdgas bzw. Methan, Brennstoffe für die seegehende Schifffahrt und Flugtreibstoffe, welche bereits als Kraftstoffe in Europa etabliert sind, werden in der FQD nicht erfasst. Im Falle eines Flugtreibstoffes ist die Zertifizierung und Zulassung durch die ASTM international anerkannt und somit weltweit gültig. Daher darf ein zugelassener Treibstoff an Flughäfen weltweit vertankt werden, ohne dass dieser in nationalen Verordnungen wie bspw. der BImSchV aufgeführt werden muss.

Im Rahmen der Renewable Energy Directive (RED II)²⁴, welche den Rahmen zur Nutzung von Energie aus erneuerbaren Quellen definiert, sind strombasierte Kraftstoffe als RFNBO (renewable fuels of non-biological origin)²⁵ anrechnungsfähig. In der deutschen Gesetzgebung sind diese Produkte als Erfüllungsoption auf die Verpflichtung zur THG-Minderung zurzeit mit dem zweifachen ihres Energiegehaltes anrechenbar. Laut finalem Entwurf der EU-Kommission zur RED III vom 14. Juli 2021²⁶ soll eine Quote für RFNBOs für den Industriesektor zur energetischen und nicht-energetischen Nutzung eingeführt werden. Für den Transportsektor wird eine Unterquote für RFNBOs von 2,6 % in 2030 vorgeschlagen. Im Entwurf der RED III sind Multiplikatoren nur noch für den Einsatz im Flug- und Schifffahrtssektor (1,2-fach) vorgesehen. Hinsichtlich der Einführung strombasierter Flugtreibstoffe werden in der RED III keine Ziele genannt.

Direkte Verordnungen, die Mindestquoten für den Einsatz alternativer bzw. strombasierter Kraftstoffe in der Schifffahrt vorgeben, gibt es derzeit nicht, werden aber im Rahmen des Verordnungsentwurfs zur Fuel EU Maritime aktuell diskutiert.

Im Verordnungsentwurf zur RefuelEU Aviation (Stand 04/23)²⁷ wird vorgeschlagen, dass ab 2025 mindestens 2 % nachhaltig produzierte Treibstoffe (SAF – Sustainable Aviation Fuels) in der Luftfahrt eingesetzt werden sollen. Diese Anteile sollen

²³ EUR-Lex: Richtlinie 98/70/EG, <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/Richtlinie/98/70/EG> (zuletzt aufgerufen am 25.11.2022)

²⁴ Amtsblatt der Europäischen Union, RICHTLINIE (EU) 2018/2001 DES EUROPÄISCHEN PARLAMENTS UND DES RATES (zuletzt aufgerufen am 25.11.2022)

²⁵ Beinhaltet alle Kraftstoffe, die keine Biokraftstoffe oder Biogas sind und deren Energiegehalt aus anderen erneuerbaren Quellen als Biomasse stammt

²⁶ EUR-Lex: COM/2021/557 final, <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/COM/2021/557/final> (zuletzt aufgerufen am 25.11.2022)

²⁷ European Parliament Fit for 55: Parliament and Council reach deal on greener aviation fuels (Press Release, 25-04-2023), <https://www.europarl.europa.eu/news/en/press-room/20230424IPR82023/fit-for-55-parliament-and-council-reach-deal-on-greener-aviation-fuels> (zuletzt aufgerufen am 3.5.2023)

bis 2050 auf mindestens 70 % SAF erhöht werden (siehe Tabelle 1). Ab 2030 soll der Anteil synthetischer, d.h. strombasierter Kraftstoffe, bei 1,2 % der mindestens 6 % eingesetzten SAF liegen, ab 2050 sollen die strombasierten SAF dann einen Anteil in Höhe von 35 % einnehmen. Mitglieder des EU-Parlaments haben dafür votiert, den Mindestanteil erneuerbarer Kraftstoffe auf EU-Flughäfen deutlich zu erhöhen (siehe Tabelle 1).²⁸ Die Trilogverhandlungen zwischen EU-Kommission, EU-Parlament und EU-Rat hierzu sind jedoch noch nicht abgeschlossen. In Deutschland ist bereits heute eine Unterquote im Bundes-Immissionsschutzgesetz (BImSchG) § 37a verankert, wonach ab 2026 der Anteil strombasierter Kerosins (bzw. »Flugturbinenkraftstoff aus erneuerbaren Energien nicht-biogenen Ursprungs«) bei 0,5 % liegen soll. Dieser Anteil soll 2028 auf 1 % und 2030 auf 2 % erhöht werden.

Tabelle 1
Mindestanteile an SAF bis 2050 laut RefuelEU Aviation und Votierung des EU-Parlaments zur Revision der Refuel Aviation.^{27,28}

| JAHR | RefuelEU Aviation (Stand 04/23) | | Votierung EU-Parlament zur Revision | |
|------|---------------------------------|---------------------------------|-------------------------------------|---------------------------------|
| | Mindestanteil SAF Gesamt | Mindestanteil synthetischer SAF | Mindestanteil SAF Gesamt | Mindestanteil synthetischer SAF |
| 2025 | 2 % | - | 2 % | 0,04 % |
| 2030 | 6 % | 1,2 % | 6 % | 2 % |
| 2035 | 20 % | 5 % | 20 % | 5 % |
| 2040 | 34 % | 8 % | 37 % | 13 % |
| 2045 | 42 % | 11 % | 54 % | 27 % |
| 2050 | 70 % | 35 % | 85 % | 50 % |

Kritisch für synthetische Kraftstoffe ist derzeit der Delegierte Rechtsakt (Delegated Act) zu Artikel 27 der RED II zu sehen, der die Regelungen zum Strombezug bei der Herstellung des klimaneutralen Wasserstoffs enthält. Am 13.2.2023 hat die EU Kommission die Delegated Acts zum Strombezug (Art. 27 der RED) und zur THG Methodologie (Art. 28 der RED) veröffentlicht. Mit der Veröffentlichung beginnt nun die viermonatige Frist, in der Parlament und Rat die Regeln zurückweisen können.

²⁸ European Parliament
– Legislative Observatory:
Sustainable aviation fuels
(ReFuelEU Aviation Initiative),
<https://oeil.secure.europarl.europa.eu/oeil/popups/summary.do?id=1710890&=e&l=en> (2021/0205(COD) - 07/07/2022) (zuletzt aufgerufen am 25.11.2022)

Im Delegated Act zum Strombezug (Art. 27 der RED) werden Regelungen zur Zusätzlichkeit und zur zeitlichen und geografischen Korrelation der Stromerzeugung gemacht (siehe hierzu auch Infokasten).²⁹ Die von der Kommission vorgeschlagenen Regelungen sind allerdings insbesondere für die Umsetzung von Projekten (Pilotanlagen und Demonstratoren) herausfordernd, da in solchen Anlagen für gewöhnlich der Strom aus dem Netz genommen und über Verträge ohne räumlichen Bezug Grünstrom eingekauft wird.

Der Delegated Act zur THG Methodologie (Art. 28 der RED) gibt u.a. die Regulierung für die Verwendung von CO₂ vor.³⁰ Ein Problem besteht weiterhin in Hinblick auf die Verwendung von CO₂ aus Industriepunktquellen. Diese sind begrenzt auf Fälle, die im ETS gelistet sind oder in einem vergleichbaren CO₂ Abgabensystem. Die Verwendung ist begrenzt bis 2036 (aus Stromerzeugung) bzw. 2041 (aus anderen Industrieprozessen).

Delegated Act zum Strombezug

Das **Zusätzlichkeitsgebot** verlangt, dass der verwendete erneuerbare Strom aus Stromerzeugungsanlagen stammt, die nicht früher als 36 Monate vor der RFNBO-Produktionsanlage in Betrieb genommen und nicht öffentlich gefördert wurden. Für Projekte, die **vor dem 1. Januar 2028** in Betrieb genommen werden, gilt die Zusätzlichkeit erst ab 2038.

Zeitliche Korrelation bedeutet, dass der erneuerbare Strom in **derselben Stunde** wie der Wasserstoff produziert werden muss. Dies jedoch soll erst **ab 2030** gelten. Bis **Ende 2029** darf der erneuerbare Strom im **selben Monat** wie das RFNBO erzeugt werden. Den EU-Mitgliedsstaaten wird allerdings die Möglichkeit eingeräumt, bereits ab dem **1. Juli 2027** **schärfere Vorgaben** zur zeitlichen Korrelation zu erlassen.

Die geografische Korrelation verlangt, dass sich der Elektrolyseur zur Wasserstoffproduktion und die Erzeugungsanlage des erneuerbaren Stroms in einer Gebotszone befinden, um Netzengpässe zu vermeiden. Wenn keine systematischen Engpässe vorliegen, darf sich die Stromerzeugungsanlage in einer benachbarten Zone befinden.

In folgenden Fällen kann aus dem Netz entnommener Strom als vollständig erneuerbar angerechnet werden:

- › Wenn sich die Produktionsanlage, in welcher die RFNBOs erzeugt werden, in einer Gebotszone befindet, in der der durchschnittliche Anteil an erneuerbarem Strom im vergangenen Kalenderjahr 90 % überschritten hat und die RFNBO Produktion eine Stundenhöchstzahl, die im Verhältnis zum Anteil des erneuerbaren Stroms in dieser Gebotszone steht, nicht überschreitet.
- › Wenn sich die Produktionsanlage, die die RFNBOs erzeugt, in einer Gebotszone mit einer Emissionsintensität der Stromerzeugung von weniger als 18 g CO₂-Äq. pro MJ befindet.
- › Bei einem Redispatch (d.h. einem Eingriff in die Erzeugungsleistung von Kraftwerken, um Leitungsabschnitte vor einer Überlastung zu schützen) kann Netzstrom bezogen werden, wenn sich dadurch der Redispatch reduziert.

²⁹ European Commission – C(2023) 1087 final COMMISSION DELEGATED REGULATION (EU) supplementing Directive (EU) 2018/2001 of the European Parliament and of the Council by establishing a Union methodology setting out detailed rules for the production of renewable liquid and gaseous transport fuels of non-biological origin, https://energy.ec.europa.eu/system/files/2023-02/C_2023_1087_1_EN_ACT_part1_v8.pdf (zuletzt aufgerufen am 1.3.2023)

³⁰ European Commission – C(2023) 1087 final COMMISSION DELEGATED REGULATION (EU) for a minimum threshold for GHG savings of recycled carbon fuels and annex, https://energy.ec.europa.eu/delegated-regulation-minimum-threshold-ghg-savings-recycled-carbon-fuels-and-annex_en (zuletzt aufgerufen am 1.3.2023)

Materialverträglichkeit (»No Harm«)

Bezüglich der Kompatibilität mit der vorhandenen Infrastruktur und der Bestandsflotte ist der erste wichtige Schritt die Überprüfung der Normparameter und im Falle einer Abweichung die Bewertung des Kraftstoffs in dieser Hinsicht. Ein Parameter, der nicht in der Anforderungstabelle der Norm enthalten ist, kann jedoch einen erheblichen Einfluss auf die Einsatzfähigkeit in Bestandskomponenten haben. Beispiele hierfür aus der Vergangenheit sind die bekannten Unverträglichkeiten von Aluminiumbauteilen im Hochdruckbereich des Kraftstoffeinspritzsystems beim Einsatz höherer Ethanolbeimischungen und das zu starke Quellen von Dichtungsmaterialien auf Basis von NBR (Englisch: Nitrile Butadiene Rubber) beim Einsatz von Ethanol und/oder FAME. Die genannten Unverträglichkeiten standen schlussendlich einem flächendeckenden Einsatz von Ethanol und FAME als Blendkomponente nicht im Wege, im Gegensatz zum Einsatz dieser Kraftstoffe in reiner Form. Unverträglichkeiten mit Materialien, die vom Einsatz der Reinkraftstoffe bekannt waren und häufig gravierende Probleme mit nicht angepasster Fahrzeugtechnik verursachten, führten aufgrund unzureichender Kommunikation zu erheblicher Unsicherheit und zu zeitweiliger Nichtakzeptanz der Blendkraftstoffe durch die Verbraucher.

Um etwaige vergleichbare Herausforderungen im Vorfeld zu entdecken und geeignet handhaben zu können, wird die Einlagerung von Elastomer-, Thermoplaste- und Metallproben bei unterschiedlichen Temperaturen und für verschiedene Einlagerungszeiten sowohl für alternative Diesel- als auch Ottokraftstoffe betrachtet. Nur Einlagerungsversuche von Materialproben allein sind jedoch nicht ausreichend. Um die Interaktion mehrerer Materialpaarungen mit dem Kraftstoff zu testen, können komplette Bauteile eingelagert werden. Hierbei werden jedoch weder das Strömen des Fluids noch die Interaktion verschiedener Bauteile erfasst. Dies kann zu Herausforderungen führen, da die Loslösung von Spuren eines Materials in einem Bauteil für das betroffene Bauteil selbst zwar unkritisch sein kann, jedoch an anderer Stelle im System ggfs. zu Problemen führt. Ein Beispiel aus der Vergangenheit ist der Einsatz verzinkter Materialien im Bereich des Fahrzeugtanks, denn Zink begünstigt bereits in geringen Konzentrationen von 2 mg/kg im Kraftstoff signifikant die Neigung zur Bildung von äußeren Ablagerungen an Dieseleinspritzdüsen. Derartige Fragestellungen können sowohl mit Einzelkomponenten-Hardware-in-the-Loop-Prüfständen als auch über mehrere Gesamtsystem-Prüfstände, jeweils für alternative Diesel- und Ottokraftstoffe, geklärt werden.

Emissionen

Anthropogene Emissionen gilt es aufgrund ihrer zum Teil umwelt- oder gesundheitsgefährdeten Auswirkungen auf ein Minimum zu reduzieren oder noch besser komplett zu vermeiden. Emissionen können dabei in verschiedenen Formen wie beispielsweise Luftschadstoffe, (Licht-)Strahlungen oder Schallemissionen auftreten und werden in Deutschland grundlegend im Bundes-Immissionsschutzgesetz (BImSchG) geregelt.

Die nachfolgend beschriebenen Emissionen begrenzen sich auf die Luftschadstoffe (inkl. Treibhausgase) im Verbrennungsabgas und stehen in den Fact Sheets im Vergleich zu den Emissionen bestehender Kraftstoffoptionen.

Die zulässigen Schadstoffemissionen von Fahrzeugen werden zusätzlich über die Fahrzeug-Typenzulassung bzw. CO₂-Flottengrenzwerte begrenzt. So bestehen heute Abgasnormen für Pkw und leichte Nutzfahrzeuge, d.h. Kleintransporter (Euro-6), Motorräder (Euro-5), schwere Nutzfahrzeuge wie z.B. Lkw und Busse (Euro VI), Maschinen und Geräte im Offroad-Bereich (Stufe V) sowie Flottengrenzwerte für Pkw, leichte und schwere Nutzfahrzeuge. Hingegen werden in der seegehenden Schifffahrt die Emissionen durch das internationale Übereinkommen MARPOL (Annex VI) direkt über Abgasgrenzwerte oder indirekt über spezifische Anforderungen an den Brennstoff reglementiert. Die Schadstoffe in der Luftfahrt werden durch Internationale Zivilluftfahrt-Organisation (ICAO CAEP/8) geregelt.

Wesentliche reglementierte Schadstoffe sind

- › CO₂ als Hauptprodukt der Verbrennung von Kohlenwasserstoffen,
- › (Ruß-)Partikel und Kohlenstoffmonoxid verursacht durch die unvollständige Verbrennung von kohlenstoffhaltigen Energieträgern – insbesondere von Aromaten,
- › Kohlenwasserstoffe verursacht durch die unvollständige Verbrennung von kohlenwasserstoffhaltigen Energieträgern
 - › sowie deren Unterteilung in Methan und Nicht-Methan-Kohlenwasserstoffe,
- › Stickstoffoxide (im Wesentlichen NO, NO₂ sowie N₂O) verursacht vor allem durch die Oxidation von Luftstickstoff bei hohen Verbrennungstemperaturen,
- › Schwefeloxide verursacht durch die Verbrennung von schwefelhaltigen Energieträgern sowie
- › Ammoniak als Ammoniak-Schlupf.

CO₂, Methan und Lachgas gelten zusätzlich als Treibhausgase. Während Wasserstoff im Gegensatz zu CO₂ und Methan nicht infrarotaktiv ist und somit nicht als klimaaktiv eingestuft wird, zählt dieser jedoch ebenso wie z.B. NO_x oder Methan zu den Vorläufersubstanzen des Ozons.³¹ Gleichzeitig hat Wasserstoff einen Einfluss auf die Konzentration und Verteilung von Hydroxylradikalen (OH), welche wiederum die Lebensdauer und Konzentration von Methan und Ozon in der Atmosphäre beeinflussen. Dementsprechend kann Wasserstoff eine indirekte Klimawirkung zugesprochen werden, die es weiter zu beforschen gilt.

³¹ Zellner, R.: Wie viel Wasserstoff verträgt die Atmosphäre? in Nachrichten aus der Chemie, GDCh (Wiley-VCH), November 2022, S. 67–70, www.gdch.app/article/wie-viel-wasserstoff-vertraegt-die-atmosphaere (zuletzt aufgerufen am 12.12.2022)

Die Markteinführung der betrachteten Kraftstoffe bietet die Möglichkeit, die Wirkweise der jeweiligen Motorenkonzepte positiv zu beeinflussen. Die chemische Zusammensetzung der Energieträger kann erhebliche Reduzierungen oder sogar Unterdrückung bei der Bildung von Luftschadstoffen bewirken. So entstehen bei der Verbrennung von kohlenstofffreien Energieträgern wie Wasserstoff oder Ammoniak keine CO₂-Emissionen. Synthetische Kraftstoffe weisen im Gegensatz zu fossilen Kraftstoffen (mit Ausnahme von Odoranten) keinen Schwefel auf, wodurch Schwefeloxidemissionen vermieden und auch im Falle von Blends bereits verringert werden können. Fehlende Aromaten bewirken bei allen synthetischen Energieträgern eine Reduktion der Partikelemissionen und Kraftstoffe bzw. Kraftstoffkomponenten ohne C-C-Bindungen, wie z.B. DME, OME, Methanol oder Methan, verbrennen sogar nahezu frei von Partikelemissionen. Andererseits können andere Schadstoffemissionen stärker in den Fokus rücken, wie beispielsweise Formaldehyd (insbesondere bei Oxygenaten wie z.B. OME), Methan-, Methanol- oder Ammoniakemissionen, wenn diese selbst als Energieträger fungieren.

Vor allem im Straßenverkehr bleiben komplexe Abgasnachbehandlungssysteme relevant, um aktuelle Abgasgrenzwerte einhalten zu können – sowohl bei Reinkraftstoffen als auch beim Blending mit fossilen Energieträgern. Hingegen beeinflusst in der Schifffahrt und im Flugverkehr die Kraftstoffqualität die Quantität der verschiedenen Emissionen im hohen Maße. Die Normung der verschiedenen Energieträger muss diese Kraftstoffqualität im Kontext der Emissionsminimierung sicherstellen.

Performance («Fit for purpose«)

Durch die Wahl der Kraftstoffzusammensetzung können Potenziale zur Steigerung der Performance im motorischen Betrieb erzielt werden. Als Beispiele sei hier nur angeführt, dass eine höhere Oktanzahl verbunden ist mit einer höheren Klopfestigkeit der eingesetzten Kraftstoffe im motorischen Betrieb. Hierdurch lassen sich mit Anpassungen bei neuen Motorgenerationen Wirkungsgradsteigerungen erzielen. Paraffinische Kraftstoffe aus Fischer-Tropsch-Prozessen haben in der Anwendung eine höhere Oxidationsstabilität (längere Lagerzeiten des Kraftstoffs sind möglich) oder sind wesentlich stabiler gegen interne Injektor Ablagerungen. Mit derartigen Kraftstoffen lassen sich höhere Leistungsausbeuten pro Hubvolumen des Motors erzielen.

Durch die Anforderungen der Emissionen im praktischen Fahrbetrieb (engl. Real Driving Emissions, RDE; EURO-6 und -7) über den gesamten Lebenszyklus des Fahrzeugs steigen auch die Anforderungen an die Varianzbreite heute gängiger Kraftstoffe. Zur Verdeutlichung der Herausforderung soll das Beispiel dienen, dass Kraftstoffe, die die DIN EN 228 einhalten, dennoch zu einer erhöhten Rußbildungsneigung tendieren können, als die Emissionsanforderungen es zulassen. Dieses Thema ist erkannt und wird durch weiterzuentwickelnde Messverfahren und -methoden als Werkzeug für zukünftige Kraftstoffrezepturen zur Verfügung stehen.

1.2 Zielsetzung und methodischer Ansatz

Primäres Ziel dieser Analyse ist es, die gegenwärtig in Entwicklung befindlichen alternativen Kraftstoffe hinsichtlich ihrer Systemkompatibilität einzuordnen. Dieser Einordnung folgt die Abschätzung der Chancen der jeweiligen Kraftstoffe auf ein erfolgreiches und zeitnahes Marktdurchdringen unter technischen und regulatorischen Aspekten. Hierzu werden die sechs zuvor dargestellten Kraftstoff- bzw. Technik-bezogenen Anforderungen für eine erfolgreiche Markteinführung für jeden einzelnen Kraftstoff evaluiert (siehe [Abbildung 2](#)). Denn es gilt: Je höher die Integrationsfähigkeit im Sinne der Erfüllung der hier aufgeführten Anforderungen ausfällt, desto größer sind auch die Chancen des alternativen Kraftstoffes, sich am Markt durchzusetzen und einen Beitrag zur Energiewende im Verkehr zu leisten.

Zur Beurteilung der in den vorliegenden Fact Sheets analysierten Kraftstofftypen wurden relevante Ergebnisse einschließlich zur Verfügung gestellter Informationen aus der [BMW-K-Förderinitiative](#) »Energiewende im Verkehr«³² und dem BMBF-Projekt »NAMOSYN – Nachhaltige Mobilität durch synthetische Kraftstoffe«³³ ausgewertet und mit existierenden Anforderungen verglichen. Die Ergebnisse dieser Auswertung wurden in einem iterativen Verfahren anhand einer Parameterliste, Workshops je Kraftstoffklasse und Kraftstoff-Steckbriefen mit den beteiligten Verbänden diskutiert.

Auf Basis dieses iterativen Verfahrens wurde für jeden einzelnen der beforschten alternativen Kraftstoffe ein sogenanntes [Fact Sheet](#) erarbeitet. Jedes dieser Fact Sheets ist dabei wie folgt aufgebaut:

- › **Infobox:** Es erfolgt eine generelle Einordnung des alternativen Kraftstoffes bzw. der Blendkomponente in das Gesamtsystem.
- › **Fact Sheet:** Je Kraftstoff- / Blendkomponente oder Additiv wird eine kurze Darstellung zum aktuellen Kenntnisstand bzgl. der Erfüllung der sechs definierten Anforderungen für eine potenzielle Markteinführung geboten:
 - › REACH-Registrierung
 - › Normen (DIN EN, ISO, IMO, ASTM)
 - › Regularien und Verordnungen
 - › Materialverträglichkeit (»no harm«)
 - › Performance (»fit for purpose«)
 - › Emissionen
- › **Fazit:** Notwendige Handlungsschritte für eine potenzielle Markteinführung werden zusammenfassend dargestellt.

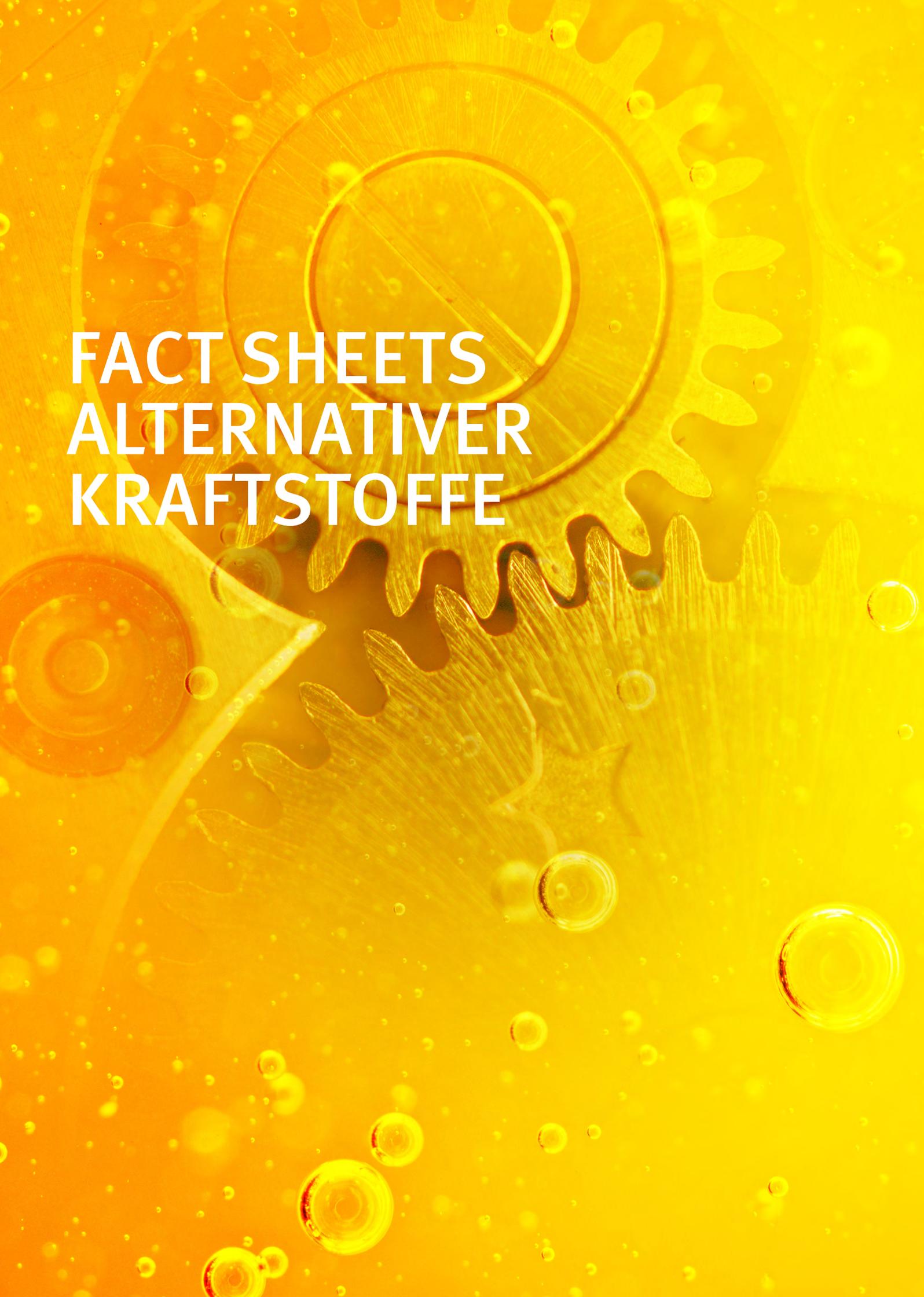
Das Teilvorhaben »NormAKraft – Normkonformität alternativer Kraftstoffe« ist Teil des Arbeitspaketes »Kraftstoffnutzung« der »Begleitforschung Energiewende im Verkehr (BEniVer)«. Teilergebnisse von NormAKraft fließen auch in die BEniVer-Roadmap mit ein.³⁴

³² Website der Initiative »Energiewende im Verkehr«, www.energiesystemforschung.de/foerdern/energiewende_im_verkehr (zuletzt aufgerufen am 8.12.2022)

³³ NAMOSYN: Nachhaltige Mobilität durch synthetische Kraftstoffe, www.namosyn.de (zuletzt aufgerufen am 8.12.2022)

³⁴ BEniVer: Roadmap der Begleitforschung Energiewende im Verkehr (Publikation in Arbeit), www.energiesystemforschung.de/beniver (zuletzt aufgerufen am 7.3.2023)



The background is a vibrant yellow with a complex, layered design. It features several interlocking gears of varying sizes, some with fine radial lines. Scattered throughout are numerous circular bubbles of different diameters, some with dark outlines and others appearing as soft, glowing spots. The overall effect is one of dynamic energy and mechanical precision.

FACT SHEETS ALTERNATIVER KRAFTSTOFFE

2.1 Synthetische Alternativen für klassische Kraftstoffe (Kohlenwasserstoffe)

2.1.1 Synthetischer Diesel (Fischer-Tropsch)

Generell besteht Dieseldieselkraftstoff heute hauptsächlich aus verschiedenen Kohlenwasserstoffen, die mittels Destillation aus Rohöl fraktioniert werden.³⁵ Diesel gehört zu den Mitteldestillaten, der Fraktion zwischen 140 °C und 380 °C, die sich zwischen den Leicht- und Schwerölen befindet, und ist somit ein veredeltes Gasöl. Durch Blending und Additivierung wird dieses Gasöl auf die notwendigen Parameter in der entsprechenden Kraftstoffnorm eingestellt.

Neben speziellen Additiven werden auch Biokraftstoffe beigemischt.

Biodiesel, auch Fettsäuremethylester bzw. FAME (Englisch: Fatty Acid Methyl Ester) genannt, ist ein Biokraftstoff, der durch Umesterung aus Pflanzenöl erzeugt wird; Biodiesel, der der Norm DIN EN 14214 entspricht, kann bis zu 7 Vol. % dem Dieseldieselkraftstoff nach DIN EN 590 beigemischt werden.³⁶ Daneben können auch hydriertes Pflanzenöl (HVO, hydrotreated vegetable oil), GtL-Kraftstoffe (GtL = Gas-to-Liquid) und BtL-Kraftstoffe (BtL = Biomass-to-Liquid) beigemischt werden.

Dieseldieselkraftstoff wird im Straßenverkehr, in Landwirtschaft, Schifffahrt und im Schienenverkehr verbraucht, aber auch in Baumaschinen und stationären Motoren. Schwere Sorten Dieseldieselkraftstoff werden als so genannte Schiffskraftstoffe in großen Motoren, vor allem Schiffsdieseln, eingesetzt. Die handelsüblichen Dieseldieselkraftstoffe weisen gegenüber Ottokraftstoff eine um etwa 10 % höhere Dichte auf, und auch der Energiegehalt pro Liter ist um etwa diesen Betrag höher.

Das charakteristische Merkmal von Diesel ist die Selbstzündung des Kraftstoff-Luft-Gemisches im Brennraum. Im Brennraum wird zunächst Luft (oder ein Luft-Abgasgemisch) komprimiert, wodurch sich diese auf etwa 700 – 900 °C erhitzt. Bei kontrollierter Einspritzung des Kraftstoffs kurz vor dem oberen Totpunkt des Zylinders wird dieser fein zerstäubt und zündet durch die hohe Temperatur. Ein Zündfunke einer Zündkerze wie beim Ottomotor ist dementsprechend nicht notwendig. Eine Kennzahl für die Zündwilligkeit ist die Cetanzahl, die für Dieseldieselkraftstoff dementsprechend möglichst hoch sein sollte.

Die Qualitätsanforderungen für Dieseldieselkraftstoff sind in der DIN EN 590 definiert, und diese wiederum ist in der 10. BImSchV verankert. Die 10. BImSchV dient der Umsetzung der europäischen Richtlinie 98/70/EG über die Qualität von Otto- und Dieseldieselkraftstoffen.

Über die so genannte PtL-Technologie lässt sich aus erneuerbar erzeugtem Wasserstoff und CO₂ Synthesegas erzeugen, welches im Fischer-Tropsch-Verfahren u.a. zu synthetischem Diesel, dem sogenannten Fischer-Tropsch-Diesel, umgewandelt wird. Dieser synthetische, strombasierte Diesel ist ein paraffinischer

³⁵ Mabanaft: Branchen-Glossar: Dieseldieselkraftstoff, www.mabanaft.com/de/news-info/branchen-glossar-energielexikon/dieseldieselkraftstoff, (zuletzt aufgerufen am 8.12.2022)

³⁶ Mabanaft: Branchen-Glossar: Biodiesel (Fettsäuremethylester / FAME), www.mabanaft.com/de/news-info/branchen-glossar-energielexikon/biodiesel-fettsauremethylester-fame, (zuletzt aufgerufen am 8.12.2022)

Kraftstoff, der dem fossilen Diesel problemlos beigemischt werden kann. Aufgrund der aktuell gültigen Verordnungen darf er in Deutschland allerdings nur als Beimischung zu fossilem Diesel an öffentlichen Tankstellen verkauft werden. Der Anteil darf dabei nur so hoch sein, dass die in der DIN EN 590 festgelegten Anforderungen an Dieselmotor Kraftstoff eingehalten werden.

Fact Sheet

In der ECHA Datenbank ist paraffinischer (synthetischer) Diesel als »C8 – C26 branched and linear hydrocarbons – Distillates« unter der EC-Nr.: 481-740-5 **REACH registriert**. Das Produkt ist unter der CAS-Nr.: 848301-67-7 5 identifiziert.

Für paraffinischen Dieselmotor Kraftstoff, liegt eine eigene **Norm DIN EN 15940** vor. Diese Norm ist in Deutschland noch nicht in der 10. BImSchV aufgeführt und so darf synthetischer Diesel nicht als Reinkraftstoff an öffentlichen Tankstellen angeboten werden. Es darf an öffentlichen Tankstellen nur Dieselmotor Kraftstoff angeboten werden, der allen Anforderungen der DIN EN 590 Norm entspricht. Somit ist synthetischer paraffinischer Diesel kein marktfähiger Kraftstoff, obwohl aus technischen Gründen einem Einsatz nichts entgegensteht. Für die Verwendung als Blendkomponente ist eine Normung nicht notwendig – das fertige Produkt muss die entsprechende Anforderungsnorm erfüllen.

Die **10. BImSchV** verbietet synthetischen Dieselmotor Kraftstoff nicht explizit, sie lässt aber nur Kraftstoffe zu, die in der Verordnung genannt sind. Da Dieselmotor Kraftstoff ausdrücklich der DIN EN 590 entsprechen muss, darf ein synthetisches Produkt nur dann in den Handel gebracht werden, wenn es alle Anforderungen dieser Norm erfüllt. Paraffinischer Diesel tut dies in Bezug auf die Dichte nicht, mit der Konsequenz, dass paraffinischer (synthetischer) Diesel nach DIN EN 15940 in Deutschland im Gegensatz zu anderen europäischen Ländern aktuell nur als Beimischung (bis ca. 26 %) an öffentlichen Tankstellen verkauft werden darf. Ebenfalls wurde bisher in Deutschland in der **1. BImSchV** paraffinisches (synthetisches) Heizöl nicht aufgenommen. In dieser Verordnung ist festgelegt, dass Heizöl EL der DIN 51603-1 nach der Fassung 2008 entsprechen muss, die ausschließlich Komponenten aus der Mineralölverarbeitung erlaubt. Alle späteren Ausgaben der Norm lassen auch die Beimischung paraffinischer Komponenten zu und sind deshalb nicht zulässig. Alle anderen Heizöle, die auch Biokomponenten enthalten dürfen, sind ebenfalls nicht durch die 1. BImSchV geregelt. Dies gilt damit auch für paraffinisches Heizöl nach DIN TS 51603-8 »Paraffinische Heizöle«. Die deutschen Verbände haben hierzu ein Rechtsgutachten erstellen lassen, welches dieser Auffassung widerspricht.

SYNTHETISCHE ALTERNATIVEN FÜR KLASSISCHE KRAFTSTOFFE (KOHLENWASSERSTOFFE)

Im Rahmen der **RED II** ist synthetischer Diesel als RFNBO (renewable fuel of non biological origin) anrechnungsfähig. Auch in der deutschen Gesetzgebung sind RFNBOs (strombasierte Kraftstoffe) als Erfüllungsoption auf die Verpflichtung zur THG-Minderung anrechnungsfähig. Im Rahmen der RED III-Diskussion wird zudem eine Unterquote für RFNBOs im Transportsektor diskutiert.

Paraffine sind gesättigte Kohlenwasserstoffe und daher aus chemischer Sicht im Allgemeinen wenig reaktiv, was sich günstig auf die generelle **Materialverträglichkeit** auswirkt. Kritische Wechselwirkungen mit Polymeren oder metallischen Werkstoffen sind nicht bekannt. Aufgrund des Fehlens von Aromaten können jedoch bestimmte Dichtungsmaterialien, welche zuvor durch Aromaten aufgequollen sind, wieder schrumpfen, was zu Undichtigkeiten führen kann. Paraffine besitzen zudem ein vermindertes Lösungsvermögen, bspw. im Vergleich zu Aromaten. Gegebenenfalls ist die Löslichkeit und das Ansprechverhalten von typischen Kraftstoffadditiven zu prüfen.

Paraffinischer Diesel hat eine vergleichbare Energiedichte wie konventionelle Dieselmotorkraftstoffe und eine hohe Zündwilligkeit (Cetanzahl), weist somit also im Vergleich mindestens so gute Eigenschaften wie sein fossiles Pendant auf. Paraffinischer Diesel ist zudem praktisch unbegrenzt mischbar mit konventionellem Diesel und daher **Drop-in-fähig**. Durch Isomerisierung lassen sich sehr gute Kälteeigenschaften erreichen (bis zu Anforderungen für arktisches Klima). Bei entsprechenden Eigenschaften ist auch die Beimischung zu Kerosin bis max. 50 % möglich. Die geforderte Schmierfähigkeit muss in der Regel mit geeigneten Additiven eingestellt werden.

Paraffinischer Diesel enthält praktisch keine Aromaten (nach aktuell gültiger Fassung der Norm sind bis zu 1,1 Gew.% zulässig), weist eine definierte Zusammensetzung bei hoher Reinheit auf, verbrennt daher sauberer und verursacht weniger **Emissionen** (Rußpartikel, Stickoxide NO_x) im Vergleich zu konventionellem Diesel aus Mineralöl.

Fazit

Die Herstellung von synthetischem Fischer-Tropsch Diesel ist eine schon lange bekannte Technologie. Die Herausforderung, diesen klimaneutral herzustellen, liegt darin eine Wasserstoff- und Kohlenstoffquelle aus erneuerbaren Energien zu nutzen. Hier gibt es besonders bei der Kohlenstoffquelle noch einigen Entwicklungsbedarf. Grüner Wasserstoff kann bei Bezug erneuerbarer Energie nachhaltig mittels Elektrolyse hergestellt werden, für die Kohlenstoffquelle gibt es drei Alternativen: Direct Air Capture (Herausfiltern des CO₂ aus der Luft), Nutzung von Biomasse oder Nutzung sogenannter Punktquellen aus nicht-vermeidbaren Industrieabgasen (Zementindustrie, Ziegeleien, etc.). Gerade die Verwendung von Punktquellen wird zurzeit im Rahmen der Erstellung der sogenannten Delegated Acts auf Europäischer Ebene kontrovers diskutiert.

Die Herstellung des grünen Wasserstoffs mittels Elektrolyse benötigt sehr viel Strom, der natürlich zwingend erneuerbar sein muss. Daher sind große Anlagen in den meisten Fällen nur dort wirtschaftlich darstellbar, wo große Mengen an grünem Strom zu geringen Preisen verfügbar sind. Dieses ist in Wind- und Sonnenreichen Regionen der Fall.

Der Fischer-Tropsch Diesel (auch synthetischer oder paraffinischer Diesel) ist nach DIN EN 15940 genormt. Im Gegensatz zu anderen europäischen Ländern ist in Deutschland diese Norm nicht in der nationalen Verordnung (in Deutschland: 10. BImSchV) aufgeführt, sodass synthetischer Diesel in Deutschland nicht als Reinkraftstoff an den Tankstellen verkauft werden darf.

Mit synthetischem Diesel kann ein entscheidender Beitrag zur Klimaneutralität geleistet werden. Synthetischer Diesel hat den großen Vorteil der Mischbarkeit, man kann ihn mit fossilem und biogenem Diesel mischen. Das ist für den Hochlauf bedeutend, denn solange die Mengen noch nicht die gesamte Nachfrage decken können, kann mit der Beimischung zumindest schon ein Teil des Verkehrs klimaneutral werden, bis dann in Zukunft 100 % synthetischer Diesel eingesetzt werden. Die bestehende Logistik vom Tankstellennetz über die Verteilung bis hin zur Tanklagerlogistik ist weiterhin nutzbar, sodass keine Investitionen in eine neue Logistik und Infrastruktur erforderlich sind.

2.1.2 Synthetisches Benzin (Methanol-to-Gasoline)

Als Synonym für Ottokraftstoff hat sich heutzutage der Begriff »Benzin« etabliert, obwohl ein Ottomotor generell auch mit anderen Kraftstoffen, wie z.B. Autogas, betrieben werden kann. Benzin ist ein Sammelbegriff für Rohbenzine (Naphtha) in der Petrochemie, Spezial- und Testbenzine (vor allem als Lösungs-/Extraktionsmittel), Fahr- oder Motorenbenzine für Fahrzeuge mit Ottomotoren und Flugbenzin für Sportflugzeuge mit Kolbenmotoren.

Ottokraftstoffe sind Kraftstoffe für Ottomotoren (Fremdzünder), die Verwendung als Fahrzeug- oder Flugzeugtreibstoff finden.³⁷ Sie bestehen überwiegend aus Kohlenwasserstoffen der als Rohbenzin (Naphtha) bezeichneten Rohölfraction im Siedebereich von 35 bis 210 °C. Motorenbenzin ist somit ein veredeltes Rohbenzin, welches durch Blending und Additivierung auf die notwendigen Parameter in den entsprechenden Kraftstoffnormen eingestellt wird. Beispiele für Additive in Ottokraftstoffen sind waschaktive Detergentien, die das Ansaugsystem des Motors sauber halten und vorhandene Ablagerungen abbauen, sowie Entschäumer zur störungsfreien Betankung. Neben solchen speziellen Additiven wird auch (Bio-)Ethanol mit 5 Vol.% (E5) bis 10 Vol.% (E10) in Deutschland beigemischt. Die meisten heutigen Fahrzeuge können diesen Kraftstoff problemlos tanken. In anderen EU-Staaten sind schon deutlich höhere Beimischungsquoten an Tankstellen verfügbar (z.B. Frankreich mit E85, also 85 Vol.% Ethanol). Auch in Deutschland ist E85 durch die DIN EN 15293 zugelassen, es gibt aber praktisch keinen Markt mehr für diesen Kraftstoff.

Die Klopfestigkeit und damit verbundene Angabe der Oktanzahl (in Deutschland auf der Zapfsäule als Research-Oktanzahl ROZ angegeben) gehört neben dem hohen Energiegehalt, der Flüchtigkeit und einer geringen Rückstandsbildung in Kraftstoffsystem und Motor zu den wichtigsten Kriterien eines Ottokraftstoffes. Das an deutschen Tankstellen angebotene Superbenzin E5 und E10 hat eine 95 ROZ, Super Plus liegt bei 98 ROZ. Bleihaltige Klopfschutzmittel zur Verbesserung der Oktanzahl sind seit 1996 in Deutschland nicht mehr zulässig. In der EU darf seit dem Jahr 2000 kein verbleites Motorenbenzin mehr für Kraftfahrzeuge verkauft werden. Flugbenzin ist davon ausgenommen.

In Deutschland regelt die Norm DIN EN 228 die Qualität dieser unverbleiten Ottokraftstoffe, die durch die 10. BImSchV verbindlich vorgeschrieben ist.

³⁷ Mabanaft: Branchen-Glossar: Ottokraftstoffe (Benzin), www.mabanaft.com/de/news-info/branchen-glossar-energielexikon/ottokraftstoffe-benzin, (zuletzt aufgerufen am 8.12.2022)

Seit Beginn des 21. Jahrhunderts werden alternative Ottokraftstoffe unter den Aspekten der Umweltverträglichkeit, Wirtschaftlichkeit sowie gesellschaftlichen Akzeptanz im Vergleich zum fossilen Pendant beforscht. Als Alternative oder Ergänzung von Ottokraftstoffen kommen Autogas (Flüssiggas, LPG), Erdgas bzw. Methan (komprimiertes Erdgas – CNG; Flüssigerdgas – LNG), Bioethanol und Rennkraftstoffe in Frage. Synthetische Kraftstoffe und Wasserstoff werden derzeit in geringen Mengen eingesetzt, befinden sich aber noch in der Entwicklungsphase.

Zu letzteren zählt auch das synthetische Benzin oder nach dem Prozess benannte Methanol-to-Gasoline (MtG). Dieses besteht aus synthetisch hergestellten Kohlenwasserstoffen, sowohl aus linearen oder verzweigten Alkanen und Alkenen als auch aus verschiedenen Aromaten. Die Zusammensetzung ist dem herkömmlichen fossilen Benzin nahezu identisch. Neben der Kreislaufnutzung des CO₂ bei der Herstellung des Synthesebenzins und einer damit verbundenen Verbesserung der CO₂-Bilanz, werden je nach Produktqualität und Aromatengehalt des MtG auch die Partikelemissionen bei der motorischen Verbrennung verringert.

MtG kann bereits heute mit der dargestellten Qualität als Blendkomponente in Kraftstoffen nach DIN EN 228 kommerziell eingesetzt werden, wenn die Normanforderungen an Ottokraftstoffe eingehalten werden. Eine spezifische Freigabe der Fahrzeugflotte ist nicht notwendig.

Fact Sheet

In der ECHA Datenbank ist MtG als »Gasoline« unter der EC-Nr.: 289-220-8 **REACH registriert**. Insgesamt sind in der ECHA Datenbank 140 aktive Registrierungen für Benzin/Gasoline gelistet, die sich in der Zusammensetzung oder der jährlichen Produktionsmenge unterscheiden. Das Produkt ist unter der CAS-Nr.: 86290-81-5 identifiziert.

Synthetisches Benzin, das als Reinkraftstoff verwendet werden soll, muss allen Anforderungen der **DIN EN 228** entsprechen. Eine eigene Norm für MtG gibt es bisher nicht. Für die Verwendung als Blendkomponente ist eine Normung allerdings auch nicht notwendig – das fertige Produkt muss lediglich die entsprechende Anforderungsnorm erfüllen. Die bislang produzierten und untersuchten MtG Qualitäten machten eine Aufbereitung im Downstreaming nötig, um den Aromaten- bzw. Durol-Gehalt zu verringern. Die im Vergleich zu fossilem Ottokraftstoff geringere Oktanzahl gilt es im Blend nicht zu unterschreiten bzw. mit sog. Oktanzahl-Boostern zu erhöhen.

Die relevanten Verordnungen (BlmSchV und RED II) sind nicht eindeutig auf MtG ausgelegt. Während die **10. BlmSchV** keinen direkten Passus zu MtG besitzt und die DIN EN 228 als Kraftstoffnorm aufgenommen hat, kann MtG hier als erneuerbare Komponente analog zu Ethanol verwendet werden. Im Rahmen der **RED II** ist MtG ggfs. als RFNBO (renewable fuel of non biological origin) anrechnungsfähig. In der deutschen Gesetzgebung sind RFNBOs (strombasierte Kraftstoffe) als Erfüllungsoption auf die Verpflichtung zur THG-Minderung anrechnungsfähig. Im Rahmen von **RED III**-Diskussionen wird eine Unterquote für RFNBOs im Transportsektor für 2030+ diskutiert.

Generell ist mit einer hohen gegebenen Materialverträglichkeit zu rechnen, da die Zusammensetzung von MtG als Blendkomponente nahezu identisch mit dem fossilen Pendant ist. Die im Rahmen von NormAKraft und C₃-Mobility durchgeführten Untersuchungen zeigten keine Unverträglichkeit von MtG sowohl in der Anwendungstechnik als auch von ausgewählten Werkstoffprüfungen. Zusätzlich werden Untersuchungen zu MtG E10 und MtG E20 Mischungen durchgeführt, deren Ergebnisse noch ausstehen. Ergänzend laufen derzeit noch Untersuchungen zur Korrosionsneigung. Eine potenziell negative Beeinträchtigung kann jedoch durch geeignete, marktübliche Additivierung vermieden werden (weiterführende Informationen in Annex I der vorliegenden Studie).³⁸ [A]1

MtG hat eine hohe **Drop-In Fähigkeit** zu EN 228 Ottokraftstoffen und weist generell eine gute **Performance** auf. Die Oktanzahl ist mit RON ~92 niedriger als der fossile Kraftstoff. Die Oktanzahl kann allerdings durch geeignete Oktanzahlbooster angepasst werden, welche zum Teil bereits heute dem fossilen Kraftstoff beigemischt werden. Potenziell sind bereits »grüne« Oktanzahlbooster für den Markt verfügbar, so dass ebenfalls fossile Produkte in der Additivierung eingespart werden können. Einzelne Fuel-Komponenten können die Kaltstartfähigkeit negativ beeinflussen. Bisher ist die Kaltstartfähigkeit nicht in der DIN EN 228 berücksichtigt.

Durch die Verbrennung von MtG werden im Vergleich zu fossilem Ottokraftstoff ähnliche Emissionen beobachtet. Einzig die Partikelfracht (PM) ist geringer als für fossiles Benzin. Ähnlich wie bei den fossilen Kraftstoffen, wird auch bei der MtG Produktion der Fokus auf einzelne Komponenten wie bspw. Durol fokussiert, die zur Rußbildung beitragen können. Es finden bereits Diskussion statt, die novellierte EN 228 mit entsprechenden Testverfahren zur Prüfung der Rußbildungsneigung zu ergänzen. Aufgrund der synthetischen Zusammensetzung besitzt das MtG keine Schwefelverbindungen, die zu einem Anstieg der SO_x-Emissionen führen würden.

³⁸ Annex I – »Kompatibilität von kraftstoffführenden Komponenten (Tank, Intankpumpe) mit MtG und MtG-Ethanol-Blends« der vorliegenden Studie. <https://dechema.de/normakraft>

Fazit

Die Zumischung von MtG zu fossilen Kraftstoffen ist nach EN 228 zulässig und möglich. Bereits durch geringe Beimischungsquoten kann ein signifikanter und zügiger Beitrag zur THG-Minderung ermöglicht werden. Zusätzlich können positive Effekte bzgl. der Partikel-Emission mitgenommen werden. Derzeit ist die Herstellungsrouten Methanol-to-Gasoline großtechnisch verfügbar und Anlagen sind weltweit vorhanden (bspw. MtG-Anlagen in China). Eine Herausforderung liegt in der Kopplung mit erneuerbarem Strom und der CO₂-Bereitstellung, welche Stand heute nicht für einen Markthochlauf in Deutschland ausreicht. Generell ergibt die Erzeugung des synthetischen Kraftstoffes, zumindest bis zum Methanol, nur in Regionen mit hohem Anteil (und damit günstigem) erneuerbarem Strom Sinn. Dies trifft bspw. auf die MENA-Region zu. Die CO₂-Bereitstellung mittels Direct Air Capture oder aus unvermeidbaren industriellen CO₂-Quellen müssten in der Nähe der Strom-parks ermöglicht werden, um Leitungsverluste zu minimieren. Für eine großflächige Markt-einführung müssen zudem die politischen Randbedingungen bspw. zur Anrechnung auf die CO₂-Flottenziele sichergestellt werden, damit Investitionen in entsprechende Anlagen getätigt werden.

2.1.3 Synthetische paraffinische Kerosine / Sustainable Aviation Fuel (SAF)

Der bekannteste Luftfahrttreibstoff für die zivile Anwendung ist Jet A-1, welcher nach der ASTM-Norm D1655 definiert ist, dem weltweit am häufigsten verwendeten Standard für einen zivilen Luftfahrttreibstoff. Darin ist auch Jet A definiert, welches allerdings nur bei US-amerikanischen Inlandsflügen eingesetzt wird und sich lediglich durch den maximalen Gefrierpunkt von Jet A-1 unterscheidet (Jet A: $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$, Jet A-1: $-47\text{ }^{\circ}\text{C}$).^{39, 40, 41, 42} Eine weiterhin für Jet A-1 gültige Norm ist der UK Defence Standard (DEF STAN 91-91).⁴³ Daneben existieren für Russland und China noch jeweils eigene Standards, die mit den Normen GOST 10227 bzw. GB 6537 die Eigenschaften der Luftfahrttreibstoffe TS-1 (in Russland) und Jet Fuel No. 3 (in China) spezifizieren. Beide Kerosine unterscheiden sich nur geringfügig von Jet A-1.^{40, 42} Daneben gibt es mit Jet B, einem Kerosin-Benzin-Gemisch für die Zivilluftfahrt und Militär, sowie dem Flugbenzin (AvGas 100 LL, MoGas) für Sportflugzeuge noch zwei weitere Arten an Luftfahrttreibstoffen. Der Fokus dieser Studie liegt auf den Alternativen für den herkömmlichen Luftfahrttreibstoff der Sorte Jet A-1.

Gewonnen wird Jet A-1 überwiegend aus der atmosphärischen Destillation von Rohöl.⁴⁰ Dabei werden unterschiedliche Fraktionen in Abhängigkeit des Siedebereiches bzw. der Molekülgrößenverteilung erhalten. Die für die Jet A-1-Produktion relevante Fraktion ist das leichte Gasöl (besser bekannt als Kerosin), dessen Siedebereich von $175\text{ }^{\circ}\text{C}$ bis $260\text{ }^{\circ}\text{C}$ reicht und damit zwischen der Naphtha- und schweren Gasöl-Fraktion liegt, aus welchen Benzin- bzw. Dieselmotortreibstoffe gewonnen werden. Wie andere Kraftstoffe auch, wird auch Flugtreibstoff nach der Raffination mit einigen Zusätzen (Additiven) in geringen Mengen versetzt. Diese verhindern unter anderem eine unkontrollierte Entzündung, die Bildung von Ablagerungen in der Turbine sowie elektrische Aufladung. Auch das Wachstum von Organismen im Flugkraftstoff selbst wird durch Additive unterbunden. Die Lufttemperatur in Reiseflughöhe beträgt häufig weniger als $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$, weshalb auch einer Vereisung durch geeignete Additive entgegengewirkt wird. NATO-Militärflugzeuge nutzen im Prinzip den gleichen Flugtreibstoff wie Jet A-1, unter der Bezeichnung Jet Propellant-8 (JP-8), der sich im Wesentlichen durch noch speziellere Additive auszeichnet.

Da für eine erfolgreiche Energiewende auch im Luftverkehr CO_2 -Emissionen deutlich eingespart werden müssen, Elektroantrieb und Wasserstoff als Treibstoff bzw. Antriebsarten allerdings aktuell noch keine Alternativen sind, werden derzeit in einer Vielzahl von Forschungs- und Pilotprojekten nachhaltige Flugkraftstoffe – sogenannte Sustainable Aviation Fuels (SAF) – untersucht.⁴⁴ Solche synthetischen paraffinischen Kerosine bestehen aus gesättigten (d.h. nur C-C-Einfachbindungen enthaltenden) Kohlenwasser-

³⁹ ASTM Standard D1655-22a – Standard Specification for Aviation Turbine Fuels, <https://www.astm.org/d1655-22a.html> (zuletzt aufgerufen am 9.12.2022)

⁴⁰ Bishop, G. J.: Aviation Turbine Fuels. In: Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry. 7., vollständig überarbeitete Aufl. Weinheim: Wiley-VCH, 2011. ISBN 978-3-527-32943-4, Vol. 4, S. 459-473

⁴¹ Braun-Unkloff, M.; Riedel, U.: Alternative fuels in aviation. CEAS Aeronaut. J. 6 (2015), Nr. 1, S. 83-93

⁴² Dorrington, G. E.: Certification and Performance: What Is Needed From an Aviation Fuel?. In: Chuck, C. J.: Biofuels for Aviation. Amsterdam u.a.: Academic Press (Elsevier), 2016. – ISBN 978-0-12-804568-8, S. 35-44

⁴³ Defence Standard 91-091, Issue 9 – Turbine Fuel, Aviation Kerosene, JET A-1, www.dstan.mod.uk/StanMIS/Indexes/DefenceStandards (zuletzt aufgerufen am 8.12.2022)

⁴⁴ Mabanaft: Branchen-Glossar: Sustainable Aviation Fuels (SAF) - nachhaltige Flugkraftstoffe, www.mabanaft.com/de/news-info/branchen-glossar-energielexikon/sustainable-aviation-fuels-saf-nachhaltige-flugkraftstoffe, (zuletzt aufgerufen am 8.12.2022)

stoffen von linearer und/oder (leicht) verzweigter Struktur; sie sind somit aromatenfrei. In einer bis zu 50 %-igen Mischung mit konventionellem, rohölbasiertem Kerosin (Jet A-1) können SAFs bereits heute in der kommerziellen Luftfahrt eingesetzt werden. Der Einsatz eines 100 %-igen SAF ist aufgrund fehlender Zulassung bzw. Zertifizierung bislang nicht möglich. Es ist auch zu beachten, dass ein synthetisches Kerosin über unterschiedliche Prozesse sowie aus unterschiedlichen Rohstoffen hergestellt werden kann und jedes einzelne Kerosin jeweils einer eigenen Zulassung bedarf.

Die geläufigsten Herstellungswege sind das Fischer-Tropsch-Verfahren (FT-Verfahren), die HEFA-Synthese und der AtJ-Prozess. Während FT- und HEFA-Kerosine aus überwiegend linearen Kohlenwasserstoffen bestehen, weist ein AtJ-Kerosin überwiegend verzweigte Kohlenwasserstoffe auf. Grund hierfür ist dessen Synthese aus Alkoholen, wobei gegenwärtig nur Ethanol und Isobutanol als Ausgangsstoffe zugelassen sind.

Mit der Verwendung von synthetischen Kerosinen können die Schadstoffemissionen des Luftverkehrs deutlich reduziert werden. Dies betrifft zum einen die CO₂-Bilanz, die v.a. aufgrund der Etablierung eines Kohlenstoffkreislaufs durch die Wiederverwendung bereits vorhandener C-Quellen verbessert wird. Aufgrund des hohen paraffinischen Anteils und des Fehlens von Aromaten (wichtige Rußvorläufer) in der Zusammensetzung der SAFs wird auch die Emission von Rußpartikeln, die wegen der Förderung der Wolkenbildung als sogenannte Nicht-CO₂-Effekte ebenfalls zur Erderwärmung beitragen, gemindert. Ebenfalls erheblich verringert wird der Ausstoß von SO_x-Emissionen, da schwefelhaltige Komponenten in synthetischen Treibstoffen gänzlich fehlen und nur aufgrund der Gewinnung von konventionellem Jet A-1 aus Erdöl in der Kerosin-Treibstoffmischung vorhanden sind.

Fact Sheet

Synthetisches paraffinisches Kerosin als 50 %-Blend mit konventionellem Jet A-1

In der ECHA-Datenbank findet sich die **REACH-Registrierung** zu verschiedenen Arten synthetischen Kerosins (siehe Appendix). Für FT-Kerosin gibt es zwei Einträge, die sich hinsichtlich der bei der Registrierung angegebenen jährlichen Produktionsmengen unterscheiden. Innerhalb der Förderinitiative »Energiewende im Verkehr« wird auch eine mögliche Produktion von Kerosin aus Methanol betrachtet – Methanol-to-Jet (MtJ). Für alkoholstämmige Kerosine werden keine Angaben zur Art des als Ausgangsmaterial genutzten Alkohols gemacht. Daher kann nicht eindeutig gesagt werden, ob für MtJ-Kerosin eine REACH-Registrierung bereits vorhanden ist oder neu zu beantragen sein wird.

Wie bereits im Hintergrund der Analyse beschrieben, muss synthetisches Kerosin für den Einsatz in der kommerziellen Luftfahrt einen Zertifizierungsprozess gemäß **ASTM D4054** erfolgreich durchlaufen. Nur dann kann es als zertifizierter Treibstoff dem Anhang der international gültigen Norm **ASTM D7566** hinzugefügt werden. Je nach Art des jeweiligen

synthetischen Kerosins ist die Spezifikation gemäß ASTM D7566 als Drop-in-Fuel zum konventionellem Jet A-1 mit einer Beimischungsquote von bis zu 50 Vol.% möglich. Gegenwärtig sind sieben verschiedene synthetische Treibstoffe im Anhang der ASTM D7566 aufgelistet (siehe Appendix). FT-Kerosin (FT-SPK / SPK = Synthetic Paraffinic Kerosene) ist als Drop-in-Fuel für die Verwendung als bis zu 50 %-Blend mit Jet A-1 zugelassen. Da die Zertifizierung neben dem Produkt auch das Ausgangsmaterial und den Syntheseweg umfasst, ist das MtJ-Kerosin hingegen noch nicht für den Einsatz zugelassen. Im Anhang 5 der ASTM D7566 ist festgeschrieben, dass die Verwendung und der Einsatz von synthetischem Kerosin, das aus Alkoholen hergestellt wird, gegenwärtig nur für die Synthesewege über Ethanol oder Isobutanol zugelassen ist.

Die Zertifizierung und Zulassung eines Flugtreibstoffes durch die ASTM ist international anerkannt und weltweit gültig. An Flughäfen darf ein zugelassener Treibstoff daher vertankt werden ohne dass dieser in nationalen **Verordnungen** wie bspw. der BlmSchV aufgeführt werden muss. Allerdings muss ein neuer Treibstoff und/oder dessen Lieferant ggf. durch das Luftfahrtbundesamt zugelassen werden. Der Einsatz von Treibstoffen richtet sich daher vor allem nach dem Erfüllen der Anforderungen an den Treibstoff selbst. So wird der Treibstoff üblicherweise auch am Flughafen noch einmal einer Qualitätskontrolle unterzogen, um sicher zu stellen, dass der Treibstoff in jeder Phase der Handhabung (z.B. beim Lagern, Einfüllen in Tankwagen oder Betankungsvorgang) eine gleichbleibende Qualität aufweist und sich in keinen Eigenschaften verändert bzw. verunreinigt wird.

Die Bestimmung der **Fit-for-Purpose-Eigenschaften** ist Bestandteil des Zertifizierungsprozesses gemäß ASTM D4054. Jeder zugelassene synthetische Treibstoff kann daher uneingeschränkt in einem Blend mit fossilem Kerosin (bis zu max. 50 Vol.%) verwendet werden. Anpassungen am Triebwerk oder an einzelnen Komponenten sind nicht notwendig. Während des Zertifizierungsprozesses werden u.a. auch Untersuchungen an einzelnen Komponenten sowie zum Verhalten bei der Verbrennung im Triebwerk, einschließlich von Langzeitversuchen, durch die Triebwerks- und Flugzeughersteller durchgeführt. Dadurch ist auch die **Materialverträglichkeit** eines zertifizierten Treibstoffes gewährleistet. SAF können zudem aufgrund ihrer sehr ähnlichen Eigenschaften zu konventionellen Flugkraftstoffen auf gleiche Weise gelagert, transportiert und umgeschlagen werden.

Mit dem Einsatz eines 50 %-Blends bestehend aus konventionellem Jet A-1 und einer synthetischen Komponente können **Schadstoffemissionen** teilweise deutlich reduziert werden. Der hohe Anteil an kettenförmigen Kohlenwasserstoffen (Paraffine) wirkt sich rußmindernd aus. Im rohölbasiertem Jet A-1 sind Aromaten enthalten (bis zu 25 Vol.% sind erlaubt), die als wesentliche Rußvorläufer gelten. Durch die Mischung von Jet A-1 mit einem synthetischen Kerosin wird der Aromaten-Anteil deutlich reduziert und somit

auch die Rußpartikelemission. Allerdings muss der fertige Blend laut ASTM D7566 mindestens 8 Vol.% Aromaten aufweisen – ein Grund warum gegenwärtig nur max. 50 %-Blends eine ASTM-Zulassung haben. Die Verwendung eines 50 %-Blends ermöglicht ferner eine Minderung der Emissionen von Kohlenmonoxid (CO) sowie von unverbrannten Kohlenwasserstoffen (HC-Emissionen).

Auch hinsichtlich direkter CO₂-Emissionen können synthetische, paraffinische Treibstoffe ebenfalls zu einer Minderung beitragen. Zum einen ist die spezifische, massenbezogene Energiedichte bei reinem paraffinischem Kerosin etwas höher verglichen zu einem fossilem Jet A-1. Außerdem kann aufgrund des höheren H:C-Verhältnisses von synthetischem Kerosin die Verbrennung vollständiger und damit effizienter ablaufen, was den Treibstoffverbrauch sowie die CO₂-Emissionen ebenfalls mindert.

Einen weiteren positiven Einfluss haben synthetische Treibstoffe auf die Emissionen von Schwefelverbindungen, v.a. von Schwefeloxiden (SO_x). Gemäß der Norm für Jet A-1 (ASTM D1655) dürfen im Treibstoff bis zu 0,3 % Gesamtschwefelgehalt enthalten sein. Dieser stammt aus dem Rohöl und wird bei der Verbrennung als SO_x emittiert. Da der Schwefel allein aus dem Rohöl herrührt, bewirkt eine Mischung mit synthetischem Kerosin eine Verringerung des Gesamtschwefelgehaltes und somit auch der Schwefelemissionen. Bezüglich von Stickoxid-(NO_x-)Emissionen hat der Einsatz von synthetischem Kerosin nahezu keinerlei Einfluss, da diese bei der Verbrennung maßgeblich durch die Reaktion des in der Luft vorhandenen Stickstoffs (N₂) entstehen (thermisches NO_x).

Fact Sheet

100 % Synthetisches paraffinisches Kerosin

In der ECHA-Datenbank findet sich die **REACH-Registrierung** zu verschiedenen Arten synthetischen Kerosins (siehe Appendix). Im Gegensatz zur ASTM-Zertifizierung werden in der ECHA-Datenbank keine Aussagen zu Ausgangsstoffen oder Beimischungsmengen bzw. -begrenzungen gemacht. Abgesehen von »Petroleum kerosene fraction, co-processed with renewable hydrocarbons of plant and/or animal origin«, wo es sich dem Namen nach bereits um einen herstellungsbedingten Blend handelt, sollte die Registrierung unabhängig von der Verwendung als Reinstoff oder als Blend Gültigkeit haben.

Wie bereits für ein 50 %-Blend aus SAF und konventionellem Kerosin erwähnt, muss der Treibstoff für den Einsatz von synthetischem Kerosin in der kommerziellen Luftfahrt einen Zertifizierungsprozess gemäß **ASTM D4054** erfolgreich durchlaufen. Nur dann kann das synthetische Kerosin als zertifizierter Treibstoff dem Anhang der international gültigen **Norm ASTM D7566** hinzugefügt werden; nur dann darf damit geflogen werden. Gegenwärtig wird 100 % SAF im Anhang der ASTM D7566 nicht

SYNTHETISCHE ALTERNATIVEN FÜR KLASSISCHE KRAFTSTOFFE (KOHLENWASSERSTOFFE)

geführt. Für 100 % synthetisches paraffinisches Kerosin (also ohne, dass ein Blend mit fossil basiertem Jet A-1 vorgeschrieben ist) existiert noch keine Zulassung bzw. Zertifizierung nach ASTM D7566.

Die Zertifizierung und Zulassung eines Flugtreibstoffes durch die ASTM ist international anerkannt und weltweit gültig. Bei einer Zulassung würde dann auch für ein 100 % synthetisches paraffinisches Kerosin gelten, dass es an Flughäfen vertankt werden darf, ohne dass dieser in nationalen **Verordnungen** wie bspw. der BImSchV aufgeführt werden muss. Aber auch hier muss ein neuer Treibstoff und/oder dessen Lieferant ggf. durch das Luftfahrtbundesamt zugelassen werden. Auch im Falle eines 100 % synthetischen Kerosins ist davon auszugehen, dass der Treibstoff üblicherweise am Flughafen noch einmal einer Qualitätskontrolle unterzogen wird, um sicher zu stellen, dass der Treibstoff in jeder Phase der Handhabung (z.B. beim Lagern, Einfüllen in Tankwagen oder Betankungsvorgang) eine gleichbleibende Qualität aufweist und sich in keinen Eigenschaften verändert bzw. verunreinigt wird.

Die Bestimmung der **Fit-for-Purpose-Eigenschaften** ist Bestandteil des Zertifizierungsprozesses gemäß ASTM D4054. Jeder zugelassene synthetische Treibstoff kann daher uneingeschränkt in einem bis zu max. 50 %-Blend mit fossilem Kerosin verwendet werden. Anpassungen am Triebwerk oder an einzelnen Komponenten sind nicht notwendig. In Testflügen mit 100 % SAF wurde bereits nachgewiesen, dass auch diese direkt verwendet werden können. Während des Zertifizierungsprozesses werden u.a. auch Untersuchungen an einzelnen Komponenten sowie zum Verhalten bei der Verbrennung im Triebwerk, einschließlich von Langzeitversuchen, durch die Triebwerks- und Flugzeughersteller durchgeführt. Dadurch ist auch die **Materialverträglichkeit** eines zertifizierten Treibstoffes gewährleistet. Rein synthetisches Kerosin wurde bislang nur in Testflügen eingesetzt. Aussagen zur Materialverträglichkeit über einen längeren Zeitraum können daher noch nicht getroffen werden. Aber auch für reine SAF trifft zu, dass diese aufgrund ihrer sehr ähnlichen Eigenschaften zu konventionellen Flugkraftstoffen auf gleiche Weise gelagert, transportiert und umgeschlagen werden können.

Mit dem Einsatz von einem reinen synthetischen Kerosin (100 % SAF) können **Schadstoffemissionen** teilweise deutlich reduziert werden. Der hohe Anteil an kettenförmigen Kohlenwasserstoffen (Paraffine) wirkt sich rußmindernd aus. Im rohölbasiertem Jet A-1 sind Aromaten enthalten (bis zu 25 Vol.% sind erlaubt); diese gelten als wesentliche Rußvorläufer. Entsprechend besteht ohne das Vorhandensein der Aromaten im Treibstoff ein hohes Potential die Partikelemission deutlich zu reduzieren. Die Verwendung von einem (aromatenfreien) synthetischen Kerosin (100 % SAF) ermöglicht neben der Verringerung der Rußpartikelemissionen auch die Reduzierung der Emissionen von Kohlenmonoxid (CO) sowie von unverbrannten Kohlenwasserstoffen (HC-Emissionen).

Wie auch für Blends gilt, dass ein höherer Anteil an synthetischen, paraffinischen Treibstoffen zu einer dem Anteil entsprechenden Minderung der CO₂-Emissionen beiträgt. Auch hier ist die spezifische, massenbezogene Energiedichte bei reinem paraffinischem Kerosin etwas höher. Hinzu kommt, dass die Effizienz der Verbrennung im Triebwerk eines 100 %-igen paraffinischen Treibstoffs leicht verbessert ist (ohne Berücksichtigung verschiedener Betriebsbedingungen), was den Treibstoffverbrauch sowie die CO₂-Emissionen reduziert.

Einen weiteren positiven Einfluss hat ein 100 % SAF auf die Emissionen von Schwefelverbindungen, v.a. von Schwefeloxiden (SO_x). Da der im Jet-A1-Treibstoff vorhandene Schwefel aus dem Rohöl herrührt, treten Schwefel-Emissionen bei dem Einsatz von 100 %, d.h. reinen synthetischen Treibstoffen nicht mehr auf. Ähnlich zum 50 %-Blend hat der Einsatz eines reinen SAF ebenfalls kaum einen Einfluss auf die Stickoxid-(NO_x-)Emissionen-, da diese bei der Verbrennung maßgeblich durch die Reaktion des in der Luft vorhandenen Stickstoffs (N₂) gebildet werden (thermisches NO_x).

Fazit

Die Verwendung von 100 % synthetischem paraffinischem Kerosin erlaubt die Reduzierung der Netto-CO₂-Emissionen wie auch weiterer Schadstoffemissionen, insbesondere von Rußpartikeln und Schwefelverbindungen. Die Minderung der Emissionen ist bzw. wäre beim Einsatz von 100 % SAF deutlich größer als bei einem 50 %-Blend mit fossilem Kerosin, jedoch ist der Einsatz eines 100 % SAF aufgrund fehlender Zertifizierung noch nicht möglich, obgleich dessen Einsatzfähigkeit bereits in mehreren erfolgreichen Testflügen demonstriert wurde. Für die Anwendung in einem 50 %-Blend sind bislang sieben synthetische Kerosine entsprechend der hier gültigen Norm ASTM D7566 zertifiziert. Diese unterscheiden sich hinsichtlich ihrer Herstellungsprozesse und der verwendeten Ressourcen bzw. Einsatzmaterialien. Von diesen sind das FT-SPK und das AtJ-SPK neben dem HEFA-Kerosin SAF aus bereits etablierten Verfahren, die großtechnisch umgesetzt sind. Die Produktionskapazitäten sind allerdings noch deutlich limitiert.

2.2 Sauerstoffhaltige Kraftstoffe (Oxygenate)

2.2.1 Methanol

Methanol und seine Folgeprodukte werden neben der stofflichen Verwendung auch als Energieträger eingesetzt. Dabei kann Methanol in vielfältigen Varianten entweder direkt als Kraftstoff oder Kraftstoffzusatz eingesetzt werden. Zum Einsatz in Otto- und Diesel-Verbrennungsmotoren sind heute mehrere Möglichkeiten bekannt. Nach der Europäischen Norm für Ottokraftstoffe EN 228 sind maximale Zumischungen von 3 Vol.% zum Kraftstoff zulässig unter Zusatz von Stabilisierungsmitteln. Derartige geringe Zumischungen können von heutigen Ottomotoren ohne Anpassungen verkräftet werden.

Weiterhin kann Methanol als Zumischung in höheren Konzentrationen zum Benzin oder als nahezu reiner Methanol Kraftstoff eingesetzt werden. In Deutschland förderte das Bundesministerium für Bildung und Forschung in den 1980er Jahren einen Großversuch mit einem M15-Kraftstoff, bestehend aus 15% Methanol und 85% Benzin, und mit einem M85-Kraftstoff mit entsprechenden Verhältnissen; es testete diese mit über 1.000 Fahrzeugen aller deutschen Autohersteller mit Unterstützung der Mineralölindustrie sowie zahlreicher Forschungsinstitute ausführlich.⁴⁵ Die Fahrzeuge wurden für den Betrieb mit diesen Kraftstoffen werkstoff- und gemischbildungsseitig angepasst. Die USA, Japan, China, Neuseeland und Südafrika führten ähnliche Versuche durch.

Für die Verwendung von reinem Methanol (M100) wurden Nutzfahrzeug-Dieselmotoren entsprechend modifiziert. Wegen der niedrigen Cetanzahl von Methanol ist ein Motorbetrieb als Selbstzünder nicht möglich. Deshalb werden zusätzliche Zündhilfen in Form von Diesel-Piloteinspritzung oder Kerzen- oder Glühzündung eingesetzt. Der Tanker Lindanger ist das Typschiff für sieben Produktentanker, deren Dual-Fuel Zweitaktmotoren mit dem Brennstoff Methanol angetrieben werden. Die Dual-Fuel-Hauptmotoren vom Typ B&W 6G50ME-9.3 LGIB mit einer Nennleistung von 10.320 kW bei 100/min werden mit Methanol und MGO als Zündöl gefahren. Sie wurden von MAN B&W in Kopenhagen entwickelt und von der Motoren- und Maschinenbau-Abteilung von Hyundai Heavy Industries gebaut.⁴⁶

Als flüssiger Kraftstoff ist Methanol wegen der einfachen Handhabung im Vergleich zu gasförmigen Kraftstoffen besonders für den Verkehrssektor geeignet, sowohl für den Straßen, Wasser- und Schienenverkehr sowie mit Einschränkungen in der Luftfahrt.

⁴⁵ Deutscher Bundestag, Drucksache 10/255 (1983), <https://dserver.bundestag.de/btd/10/002/1000255.pdf>.

⁴⁶ Westfal-Larsen & Co. A/S: POWERED BY METHANOL, <http://wlco.no/methanol/> (zuletzt aufgerufen am 24.1.2023)

Fact Sheet

Für Methanol liegt eine Registrierung nach der europäischen Chemikalienverordnung **REACH** unter der EC-Nr.: 200-659-6 vor. Zudem ist das Produkt unter der CAS-Nr: 67-56-1 identifiziert.

Ein **Normungsprojekt** für den Einsatz von Methanol in Verbrennungsmotoren wurde mit der konstituierenden Sitzung des NAK 51697 »Methanol als Kraftstoff« zum 2.12.2022 unter Leitung des DIN-FAM begonnen. Bei ISO gibt es darüber hinaus seit einiger Zeit ein Projekt zur Normung von Methanol für Schiffsmotoren. In diesem Bereich ist allerdings zu beachten, dass z.B. Sicherheitsvorschriften den Einsatz leicht brennbarer Flüssigkeiten einschränken. Die Verwendung in Brennstoffzellen ist beim derzeitigen Stand des Antrags nicht vorgesehen, soll aber diskutiert werden.

In der **Verordnung** der 10. BImSchV ist die DIN EN 228 für Benzinkraftstoffe aufgenommen. Methanol kann bis zu 3 Vol.% dem Benzin innerhalb der DIN EN 228 zugemischt werden. Im Rahmen der RED II ist Methanol ggf. als RFNBO (renewable fuel of non-biological origin) anrechnungsfähig. In der deutschen Gesetzgebung sind RFNBOs (strombasierte Kraftstoffe) als Erfüllungsoption auf die Verpflichtung zur THG-Minderung anrechnungsfähig. Im Zuge der RED III-Diskussion wird derzeit eine Unterquote für RFNBOs im Transportsektor für 2030 diskutiert.

Erfahrungen zur **Materialverträglichkeit** liegen aus den 80er Jahren mit M100 und M85 vor. Der Abgleich mit der heutigen Motorentechnik ist Gegenstand laufender Projekte. Aus dem Projekt »MethanolStandard« wurde ersichtlich, dass der Einsatz von reinem Methanol in der derzeitigen Bestandsflotte nicht ohne weiteres möglich ist. Im Vergleich zu Untersuchungen der 80er Jahre, ist die heutige Motorentechnologie in Deutschland (höhere Drücke, Direct Injection, etc.) ohne Anpassung nicht M100 geeignet. Dabei spielen sowohl Werkstoffthemen wie auch die Motorsteuerung an sich eine entscheidende Rolle. So treten bei höherem Druck Kavitationseffekte am Einspritzequipment auf. Die Zumischung von höheren Methanol-Anteilen von mehr als den erlaubten 3 Vol.% müssen detaillierter untersucht werden. Zumischungen von 15 Vol.% zeigten kein einheitliches Bild bzgl. der Materialverträglichkeit bzw. Systemkompatibilität.

Sowohl der chinesische Markt (M15 bis M100 im Flottenbetrieb) als auch der US-amerikanische Markt (bis M85) zeigen jedoch eine prinzipielle Eignung von Methanol als Kraftstoff im Automotive-Bereich.

Weitere Untersuchungen werden derzeit über Projektfortführungen geplant bzw. durchgeführt. Dabei stehen die Anpassung von Motorkonzepten (niedriger Druck bzw. Geometrien zur Verhinderung von Kavitation) und Untersuchungen zur Materialverträglichkeit im Fokus.

Während sich bei den limitierten Emissionen für Kohlenwasserstoffe, Kohlenmonoxid und Stickoxide mit der heute bei Ottomotoren üblichen Katalysatortechnik keine Vorteile mehr ergeben, sind bei den nichtlimitierten Emissionen geringe Vorteile zu verzeichnen. Methanol emittiert keine Aromaten wie Benzol, Toluol und niedrigere polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe. Nachteilig ist dagegen die erhöhte Formaldehydemission, wobei das Niveau bei allen hier aufgeführten Emissionskomponenten wegen des Katalysators sehr niedrig ist. Methanol hat knapp 50 % des Heizwertes von Diesel und Benzin.

Hinsichtlich der Performance lassen sich in an M100 angepassten Motoren im Vergleich zu Benzinmotoren eine bis zu 10 % höhere Motorleistung und ein etwa 15 % besserer thermischer Wirkungsgrad erzielen.

Fazit

Methanol ist bereits heute ein wesentlicher Grundbaustein der chemischen Industrie. Aufgrund seiner möglichen Herstellungsrouten ist Methanol zudem als erster flüssiger Vertreter der sogenannten eFuels denkbar. Sowohl als Reinstoff als auch als Ressource zur Weiterverarbeitung bspw. zu MtG-Benzin wird Methanol zukünftig weltweit benötigt werden. Im maritimen Sektor wird Methanol bereits als Schiffskraftstoff genutzt. Die Verwendung im Straßenverkehr (motorische Verbrennung) findet derzeit hauptsächlich in China und den USA statt. Des Weiteren ist Methanol in der Direkt-Methanol-Brennstoffzelle oder über die Reformierung in Wasserstoff in der Brennstoffzelle einsetzbar.

Die Normung für reines Methanol befindet sich derzeit im Normungsausschuss, der entsprechende Arbeitskreis hat die Arbeit bereits aufgenommen. Die Zumischung von bis zu 3 Vol.% ist bereits heute in fossilem Ottokraftstoff erlaubt, sofern die Normspezifikationen nach DIN EN 228 eingehalten werden.

Die großflächige und höhere Zumischung von Methanol ist in straßengebundenen (on-road und off-road) Verbrennungsmaschinen bislang nur nach Anpassungen möglich. Für zukünftige Motorentwicklungen ist die Nutzung von höheren Blendraten bzw. Methanol als Reinkraftstoff denkbar.

In derzeitigen Forschungsprojekten werden die Anpassung von Motorkonzepten und Materialverträglichkeiten fokussiert.

2.2.2 Dimethylether (DME)

Dimethylether (DME) ist der einfachste Ether mit zwei Methylengruppen (Summenformel C_2H_6O) und weist eine geringe Molmasse von rund 46 g/mol auf. Unter Normbedingungen (1 atm, 20 °C) ist DME ein ungiftiges, leicht narkotisch, farb- und geruchsloses Gas. DME enthält keine C-C Bindung, der Sauerstoffgehalt beträgt 35 Gew.% und ist ein Grund für die nahezu partikelfreien Emissionen. Aufgrund seiner hohen Entzündlichkeit kann DME als Dieselsubstitut eingesetzt werden. Die Verflüssigung bei geringem Druck (~5–7 bar) führt zu ähnlichen Eigenschaften wie LPG. DME besitzt heute bereits einen großen Markt bspw. im Bereich von Treibgasen in Spraydosen. Im Kraftstoffbereich existiert seit Ende 2022 eine technische Spezifikation (DIN TS 51698 Kraft- und Brennstoffe – Anforderungen – Dimethylether (DME)) für DME zum Einsatz in Dieselmotoren. Freigaben für Fahrzeuge bzw. die Aufnahme in die 10. BImSchV sind aber derzeit noch nicht abzusehen. Auf europäischer Ebene ist DME als Blendkomponente für Autogas (LPG) in der Diskussion.

Mit der Verwendung von Dimethylether können die Schadstoffemissionen des Mobilitätssektors deutlich reduziert werden. Aufgrund der synthetischen Zusammensetzung besitzt das DME in reiner Form keine Schwefelverbindungen, die zu einem Anstieg der SO_x führen können. Die vorgeschriebene Zumischung von Odorantien zur Geruchsbildung bei potenziellen Leckagen kann durch schwefelfreie Geruchsmarker ermöglicht werden. Derzeit wird dem Erdgas bspw. Mercaptan zu dotiert, was den Schwefelgehalt im Erdgas erhöht. Die Kreislaufnutzung von CO_2 bzw. von Abfallströmen zur Herstellung des regenerativen DME (rDME) führt zudem zu einer Verbesserung der CO_2 -Bilanz. Des Weiteren zeigen Untersuchungen am Fahrzeug, dass eine deutliche Verringerung der PM Emissionen ermöglicht wird.

Fact Sheet

In der ECHA Datenbank ist DME als „Dimethylether“ unter der EC-Nr.: 204-065-8 **REACH registriert**. Das Produkt ist unter der CAS-Nr.: 115-10-6 identifiziert.

DME, der als Reinkraftstoff verwendet werden soll, ist derzeit in der DIN TS 51698 beschrieben. Diese **technische Spezifikation (Vornorm)** »DIN TS 51698 – Spezifikation für Dimethylether (DME) als Kraft- bzw. Brennstoff für Verbrennungsmotoren und Heizungssysteme«, wurde im Dezember 2022 veröffentlicht und beschreibt den Einsatz in Dieselmotoren. Sie dient als Vorläufer einer offiziellen DIN-Norm. Auf europäischer Ebene wird zurzeit die Aufnahme von DME als Blendkomponente in Autogas (LPG) diskutiert.

Derzeit sind in Deutschland laut **Verordnungen** weder die Verwendung als Reinkraftstoff noch als Blendkomponente möglich. Die Aufnahme der DIN TS 51698 in die 10. BImSchV ist nicht erfolgt. Die ISO Normung wurde zurückgestellt, die CEN Normung ist angestrebt. Gemäß der Biokraftstoffrichtlinie 2003-30-EG gilt Dimethylether als Biokraftstoff, sofern er »aus Biomasse hergestellt wird und für die Verwendung als Biokraftstoff bestimmt ist« und soll langfristig Flüssiggas ablösen. Im Rahmen der RED II ist DME ggf. als RFNBO (renewable fuel of non biological origin) anrechnungsfähig. In der deutschen Gesetzgebung sind RFNBOs (strombasierte Kraftstoffe) als Erfüllungsoption auf die Verpflichtung zur THG-Minderung anrechnungsfähig. Im Rahmen der RED III Diskussionen wird eine Unterquote für RFNBOs im Transportsektor für 2030+ diskutiert.

Durch die Verbrennung von DME werden im Vergleich zu fossilem Dieselmotorkraftstoff signifikant geringere Emissionen (PM, NO_x) beobachtet. DME besitzt eine vergleichbare Cetanzahl wie herkömmlicher Dieselmotorkraftstoff und kann in dieselmotorischen Prozessen eingesetzt werden. Im Vergleich zu Dieselmotorkraftstoff zeigt DME eine höhere Verdampfungsrates, so dass die Gemischbildung von Kraftstoff-Luft verbessert wird. Dadurch kann die Verbrennung besser ablaufen und die HC-Bildung im Abgas reduziert werden. Aufgrund der synthetischen Zusammensetzung besitzt DME keine Schwefelverbindungen, die zu einem Anstieg der SO_x führen würden.

Aufgrund der Dieselähnlichen Cetanzahl von 55 bis 60 lässt sich DME im Dieselmotor als Dieselmotorkraftstoffersatz verwenden. Dabei sind allerdings Modifikationen am Fahrzeug nötig, die hauptsächlich die Einspritzpumpe sowie den Drucktank betreffen und somit keine direkte Fit-for-Purpose Nutzung ermöglichen. Für eine optimale Verbrennung sollte zudem das Steuergerät angepasst werden. Der Heizwert liegt bei etwa 28 MJ/kg, so dass, im Vergleich zu Dieselmotorkraftstoff, ein höherer Volumenstrom benötigt wird. Der Einsatz von reinem DME benötigt in der Regel die Zugabe von Additiven zur Verbesserung der Schmierfähigkeit, da die Hochdruckpumpen im Dieselmotor kraftstoffgeschmiert sind und keinen externen Ölkreislauf nutzen.

Derzeit laufen Untersuchungen zur Korrosionsneigung. Dabei traten Korrosionserscheinungen am Einspritzequipment und den Kolbenführungen auf. Die technische Spezifikation verweist auf das noch fehlende Know-How der **Materialverträglichkeit** im Langzeittest. Eine negative Beeinträchtigung kann durch geeignete Additivierung vermieden werden. Die Additive sind bekannt und marktüblich.

Fazit

Derzeit sind in Deutschland weder die Verwendung als Reinkraftstoff noch als Blendkomponente möglich, da DME in den gültigen und damit in der 10. BImSchV gelisteten Kraftstoffen nicht erlaubt ist. Die dafür nötige Norm befindet sich derzeit bei der DIN in der Entwurfsabstimmung (DIN TS 51698). Diese Norm beschreibt den Einsatz in Dieselmotoren. Auf europäischer Ebene wird derzeit die Aufnahme von DME als Blendkomponente in Autogas (LPG) diskutiert.

In aktuellen Forschungsprojekten werden zum einen weitere Erfahrungen im Bereich Materialverträglichkeit und Korrosionsneigung erarbeitet und zum anderen Blendingstrategien mit Dieselmotoren oder Biodiesel bzw. paraffinischen Kraftstoffen untersucht. Dadurch können potenzielle Synergien gehoben werden, die zu einem geringeren Additivierungsdruck oder geringeren Modifikationsbedarf am Motor führen. Des Weiteren werden Mischungen mit LPG oder unterschiedliche Abfall-Ressourcen wie bspw. Plastikmüll untersucht.

2.2.3 Oxymethylenether (OME)

Bei OME handelt es sich um einen synthetischen Energieträger. OME steht für Oxymethylenether, eine Gruppe von chemischen Molekülen aus Wasserstoff, Kohlenstoff und Sauerstoff. Die chemische Formel von OME lautet $\text{H}_3\text{C}-\text{O}-(\text{CH}_2-\text{O})_n-\text{CH}_3$. Als Kraftstoff für Dieselmotoren werden OME mit n von 3 bis 5 favorisiert. Die Nutzung von OME kann sowohl als Reinkraftstoff, als auch als Mischungskomponente zu konventionellem Dieselmotorkraftstoff erfolgen. Die Berechnung über die Standardbildungsenthalpien von Verbrennungsprodukten und eingesetztem OME ergibt einen unteren Heizwert von etwa 19,11 MJ/kg. Der massebezogene Energiegehalt liegt somit deutlich unter dem von konventionellem Dieselmotorkraftstoff (42,5 MJ/kg).

Verschiedene Voruntersuchungen zeigen, dass sauerstoffhaltige Kraftstoffe wie OME unter besonders geringer Rußentwicklung verbrennen. Dieser Effekt führt im Motor zu niedrigen bis kaum messbaren Partikel-Emissionen (sehr niedrige Partikelmasse, PM und Partikelanzahl, PN). Diese Eigenschaft ermöglicht bislang nicht erreichbare Betriebsmodi der Verbrennungskraftmaschine wie hohe Abgasrückführung und hohe Dynamik unter besonders geringer Freisetzung von anderen Emissionskomponenten, wie z.B. Stickoxiden. Ebenfalls ist erwiesen, dass ein Vorliegen von C-C Bindungen im Kraftstoff die Bildung von Rußvorläufersubstanzen begünstigt. C₁-Kraftstoffe wie OME hingegen enthalten keine C-C-Bindungen und zeichnen sich bei gleichem Sauerstoffgehalt durch eine nochmals geringere Rußbildung als andere Oxygenate (Alkohole, etc.) aus.

Fact Sheet

Die Hauptbestandteile eines Dieseleratzkraftstoffes auf Basis von OME (OME₃ bis OME₅) besitzen jeweils eine eigene CAS-Nummer, jedoch nur im Fall des OME₃ auch eine EC-Nummer. Bei der ECHA ist lediglich OME₃ als »2,4,6,8-Tetraoxanonane« unter der EC-Nr. 818-232-3 gelistet. Daneben besteht noch eine Registrierung für die Nebenkomponente OME₂, welche als »2,4,6-Trioxaheptane« unter der EC-Nr. 818-227-6 registriert ist.

Das als Reinkraftstoff geeignete Gemisch mit den Hauptbestandteilen OME₃ bis OME₅ sowie geringen Anteilen von OME₂ und OME₆ hat die Analytik-Service-Gesellschaft mbH als **REACH-PRORD** mit der Nummer 04-2120108242-73-0000 registriert, da das Stoffgemisch aktuell nur für wissenschaftliche Forschung und Entwicklung importiert und gebraucht wird.

Vom DIN-Arbeitskreis NA 062-06-32-06 wurde eine **Technische Spezifikation (E DIN TS 51699)** erarbeitet, die die Anforderungen und Prüfverfahren für Polyoxymethylen-dimethylether (OME) für die Verwendung als Kraft- oder Brennstoff, entweder als reiner Kraft- oder als Brennstoff in einer Konzentration von 100 Vol.% festlegt. Das Dokument steht zurzeit kurz vor der Veröffentlichung. Vor der Veröffentlichung einer vollständigen Norm sind nach Meinung der Experten noch insbesondere analytische Fragen zu klären. Trotz der Tatsache, dass niedrige Beimischungsquoten von ca. 5 – 15 Vol.% OME in Diesel den Parametern der **DIN EN 590** entsprechen, darf OME nach geltender Norm nicht beigemischt werden. Dieseldieselkraftstoffen dürfen zwar Kohlenwasserstoffe zugesetzt werden, solange die Grenzwerte der DIN EN 590 eingehalten werden. Die Beimischung anderer Komponenten ist in der DIN EN 590 explizit auf FAME und Kohlenwasserstoffe wie HVO oder GtL beschränkt. Um den Weg der Inverkehrbringung z.B. an öffentlichen Tankstellen zu ebnen, müsste dieser alternative Kraftstoff zunächst in die Normen für Dieseldieselkraftstoffe als zulässige Komponente aufgenommen werden.

OME gilt nicht als Kraftstoff im Sinne der **10. BImSchV**, daher ist die Inverkehrbringung an öffentlichen Tankstellen nicht gestattet. Daneben ist die Beimischung von OME in Dieseldieselkraftstoff nach DIN EN 590 Ausgabe Oktober 2017 nicht erlaubt, da es sich bei OME nicht um reine Kohlenwasserstoffe handelt und OME nicht explizit als mögliche Blendkomponente aufgeführt wird.

Bei Untersuchungen der **Materialverträglichkeit** wurden teils erhebliche Wechselwirkungen mit verschiedenen Polymeren festgestellt. Auch typische Elastomere wie NBR und FKM, die insbesondere als Dichtungswerkstoffe häufig eingesetzt werden, sollten nicht ohne vorherige Prüfung eingesetzt werden. Beobachtet wurden starke Quellung, sowie Änderungen von Materialkennwerten (Zugfestigkeit, Härte, etc.) über den zu erwartenden Maßen hinaus. Der Einsatz von reinem OME als Kraftstoff ist mit konventionellen CR-Einspritzsystemen ohne Anpassungen nicht möglich.

Dem gegenüber ist der Betrieb mit einem Blend aus Dieseldieselkraftstoff und geringen OME-Anteilen (5 – 15 Vol.%) in modernen Euro-6 Einspritzsystemen auch ohne Anpassungen darstellbar. Im Falle älterer Euro-5 Einspritzsysteme muss die Kompatibilität gegebenenfalls geprüft werden. Im Rahmen dezidierter Verträglichkeitstests⁴⁷ (weiterführende Informationen in Annex II der vorliegenden Studie) wurde festgestellt, dass in den Hochdruckpumpen verbaute O-Ringe durch die Wechselwirkung mit dem Kraftstoff quellen können. Die Einspritzkomponenten (Kraftstofffilter, Kraftstoffverteiler, Injektor) wiesen keine Auffälligkeiten auf.

Die Schmierfähigkeit von reinem OME-Kraftstoff muss durch Additive gewährleistet werden. Die Stabilisierung erfolgt zumeist mit Hilfe des bekannten Antioxidans BHT (Butylhydroxytoluol).

⁴⁷ Annex II – »Kompatibilitätsprüfung von Euro-5 und Euro-6 Komponenten mit Diesel und OME-haltigen Blends«
<https://dechema.de/normakraft>

Was die **Performance** betrifft, konnten experimentelle Untersuchungen an einem nicht modifizierten Dieselmotor zeigen, dass OME insbesondere den Vorteil bietet, dass aufgrund der Abwesenheit von Kohlenstoff-Kohlenstoff-Bindungen eine weitgehend rußfreie Verbrennung stattfindet und damit der Zielkonflikt zwischen NO_x und Partikeln vermieden wird.⁴⁸ Emissionsvorteile bestehen nicht nur bei Einsatz von reinem OME-Kraftstoff, sondern auch bei einer Zumischung von OME zu konventionellem Dieselmotor etwa im Bereich ab 20 Vol.%. Durch gezielte Anpassung von Einspritzsystemen und Motorsteuerung lassen sich sogar Effizienzvorteile gegenüber konventionellen Dieselmotoren erzielen.

Fazit

Oxymethylenether (OME) eignen sich aufgrund ihrer verbrennungstechnischen Eigenschaften als Kraftstoff für selbstzündende Verbrennungsmotoren. In einer Reihe Forschungsvorhaben wurde die technische Eignung sowohl als Reinkraftstoff als auch als Blendkomponente zu konventionellem Dieselmotor gezeigt.

Aktuell steht eine nationale Vornorm für OME vor der Veröffentlichung, sodass sich Produzenten und Anwender auf eine grundlegende technische Spezifikation beziehen können. Im Rahmen der 10. BImSchV ist OME nicht als Kraftstoff gelistet, daher ist der Vertrieb im öffentlichen Raum derzeit nicht gestattet.

Hinsichtlich der Materialverträglichkeit müssen insbesondere geeignete Polymere (Dichtungswerkstoffe u.ä.) ausgewählt und eingesetzt werden. Typische Werkstoffe konventioneller Kraftstoffsysteme sind häufig nicht kompatibel mit reinem OME. Ein Mischkraftstoff aus Diesel und geringen Anteilen OME kann dagegen auch in konventionellen Dieselmotoren eingesetzt werden. Schmiereigenschaften und Stabilität des OME-Kraftstoffs müssen mit geeigneten Additiven gewährleistet werden.

Aufgrund der chemischen Struktur und der fehlenden Kohlenstoff-Kohlenstoff-Bindungen verbrennt OME nahezu rußfrei. Hieraus entsteht Optimierungspotential hinsichtlich der Schadstoffemissionen, insbesondere können Partikelfracht und NO_x -Emissionen erheblich reduziert werden.

⁴⁸ Jacob, E., Stark, M., Härtl, M., Wachtmeister, G. (2019). C1-Oxygenate als zukünftige Kraftstoffe. In: Tschöke, H., Marohn, R. (eds) 11. Tagung Einspritzung und Kraftstoffe 2018. Proceedings. Springer Vieweg, Wiesbaden. DOI: 10.1007/978-3-658-23181-1_2, https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-658-23181-1_2.

2.2.4 Dimethylcarbonat und Methylformiat (DMC/MeFo)

Dimethylcarbonat und Methylformiat gehören zur Klasse der sogenannten C₁-Oxygenate und eignen sich für den Einsatz in einem ottomotorischen Brennvorgang. Neben der Abwesenheit von C-C-Bindungen ist das endständige Sauerstoffatom charakteristisch für die Molekülstruktur der C₁-Ottokraftstoffe DMC und MeFo.

DMC besitzt eine hohe Klopfestigkeit, jedoch ist der Dampfdruck für eine reine Anwendung in modernen Ottomotoren zu niedrig. Ebenfalls ist bedingt durch den hohen Schmelzpunkt (2 – 4 °C) die Kalteinsatzfähigkeit nicht gegeben. Eine Mischung aus DMC mit etwa 35 Vol.% MeFo wird dagegen als geeignet angesehen, da Methylformiat unter anderem einen hohen Dampfdruck besitzt. Beide C₁-Oxygenate weisen eine hohe Klopfestigkeit (Oktanzahl) auf. Der Mischkraftstoff DMC/MeFo erlaubt zusätzliche Optimierungsmaßnahmen der Motorbetriebsparameter, beispielsweise Umsetzung eines Downsizing-Konzepts und Erhöhung des Verdichtungsverhältnisses. Hieraus resultiert ein höherer Gesamtwirkungsgrad im Vergleich zur konventionellen Motorabstimmung. Sauerstoffhaltige Kraftstoffe wie DMC/MeFo, die in ihrer Struktur keine C-C Bindungen aufweisen, ermöglichen eine weitgehend rußfreie Verbrennung.

Als mögliche Einführungszenarien für DMC bzw. MeFo gelten zum einen der Mischkraftstoff DMC/MeFo und zum anderen die Verwendung von MeFo als Mischungs-komponente zu konventionellem Ottokraftstoff. Beide Konzepte werden aktuell beforscht. Gemäß der Norm DIN EN 228 dürfen Ottokraftstoffen nur Monoalkohole und Ether zugemischt werden, weshalb eine Beimischung von DMC/MeFo derzeit nicht erlaubt ist. Im Fall einer Beimischung von DMC/MeFo zu konventionellem Kraftstoff gilt es außerdem, den maximalen Sauerstoffgehalt zu beachten, sodass DMC/MeFo diverse andere Oxygenate wie Ethanol oder Ether (MTBE, ETBE) verdrängen würde.

Fact Sheet

Die beiden Reinstoffe Dimethylcarbonat (DMC) und Methylformiat (MeFo) sind bei REACH registriert und besitzen EC-Nummern. Sowohl DMC als auch MeFo werden im industriellen Maßstab produziert und weltweit vertrieben. In der ECHA Datenbank sind sie unter den EC-Nummern 210-478-4 (Dimethyl carbonate) und 203-481-7 (Methyl formate) **REACH registriert**.

Bislang finden weder für den Mischkraftstoff DMC/MeFo noch für MeFo als reiner Kraftstoff oder als Blendkomponente **Normungsaktivitäten** statt. Gemäß der Norm DIN EN 228 dürfen Ottokraftstoffe zwar einen maximalen Sauerstoffgehalt von 2,7 Gew.% (E5) bzw. 3,7 Gew.% (E10) aufweisen, allerdings ist neben den explizit aufgeführten sauerstoffhaltigen Komponenten nur die Zumischung von Monoalkoholen und Ethern erlaubt. Oxygenate wie MeFo oder DMC sind somit nicht zulässig.

Im Rahmen von NAMOSYN konnte nachgewiesen werden, dass der DMC/MeFo-Mischkraftstoff aufgrund seiner Klopfestigkeit in Ottomotoren enorme Potentiale hinsichtlich des Wirkungsgrades und der **Schadstoffemissionen** mit sich bringt. DMC/MeFo besitzt im Magerbrennverfahren das Potential, die Stickoxidemissionen um bis zu 60 % gegenüber herkömmlichem Ottokraftstoff zu senken. Motorische Versuche zu MeFo als Blendkomponente finden derzeit noch statt und können noch nicht abschließend bewertet werden.

Eine generelle **Rückwärtskompatibilität** des DMC/MeFo-Mischkraftstoffs für die Fahrzeugbestandsflotte ist nicht gegeben. Ursache ist vor allem das verstärkte Quellverhalten von Elastomerdichtungen in bestehenden Fahrzeugen und technischen Infrastrukturen. Alternative geeignete Materialien sind zwar prinzipiell verfügbar, müssen jedoch weiterentwickelt und erprobt werden. Aufgrund der spezielleren Anforderungen sind alternative Dichtungswerkstoffe zumeist teurer im Vergleich zu den heute eingesetzten Materialien. Über die Rückwärtskompatibilität eines konventionellen Ottokraftstoffs mit MeFo-Beimischung kann derzeit noch keine sichere Aussage getroffen werden. Entsprechende Untersuchungen dauern noch an.

Als möglicherweise problematisch erweist sich ebenfalls das Kälteverhalten des DMC/MeFo-Mischkraftstoffs. In einzelnen Fällen wurde berichtet, dass sich der Kraftstoff bei tiefen Temperaturen entmischt und Partikel abgeschieden werden. Daher sollte ein geeignetes Prüfverfahren angewendet werden, beispielsweise der Cloud Point (CP). In der heutigen Norm für Ottokraftstoffe (DIN EN 228) wird dagegen das Kälteverhalten nicht abgeprüft.

MeFo wird in Gegenwart von Wasser rasch hydrolysiert, wodurch sich Ameisensäure und Methanol bilden. Die Ameisensäure katalysiert die MeFo-Zersetzung in einem selbstverstärkenden Prozess. Untersuchungen zur Inhibierung der initialen Hydrolyse-reaktion dauern derzeit noch an. Hierfür werden im NAMOSYN-Verbundvorhaben verschiedene Pufferlösungen eingesetzt. Aus den Erkenntnissen sollen später geeignete stabilisierende Additivlösungen erarbeitet werden.

Fazit

Der DMC/MeFo-Mischkraftstoff eignet sich insbesondere aufgrund der zentralen Eigenschaften Dampfdruck und Klopfestigkeit als Kraftstoff für Ottomotoren. Bei den Komponenten Dimethylcarbonat (DMC) und Methylformiat (MeFo) handelt es sich um Oxygenate, deren chemische Struktur keine Kohlenstoff-Kohlenstoff-Bindungen aufweist. Dadurch entsteht bei der Verbrennung nahezu kein Ruß und die Motorsteuerung kann hinsichtlich einer schadstoffarmen und effizienten Betriebsweise optimiert werden. Der DMC/MeFo-Mischkraftstoff besteht in etwa zu 65 % DMC und 35 % MeFo. Neben dem Mischkraftstoff wurde ebenfalls die Beimischung von MeFo zu konventionellem Ottokraftstoff untersucht, da MeFo die Klopfestigkeit des Kraftstoffs erhöht. Im Rahmen der DIN EN 228 ist derzeit jedoch nur die Zumischung von Monoalkoholen und Ethern erlaubt, sodass Oxygenate wie MeFo oder DMC sind somit nicht zulässig sind.

Für den Mischkraftstoff DMC/MeFo sind keine Normungsaktivitäten auf nationaler oder europäischer Ebene bekannt. Dementsprechend wird DMC/MeFo in der 10. BImSchV nicht aufgeführt. Ebenso gibt es derzeit keine Bestrebungen MeFo als Blendkomponente zu normen.

In Materialverträglichkeitsuntersuchungen wurden mitunter starke Wechselwirkungen mit Polymerwerkstoffen gezeigt. Insbesondere müssen geeignete Dichtungswerkstoffe ausgewählt werden. Zudem wurden auch mit buntmetallhaltigen Werkstoffen und Legierungen Unverträglichkeiten beobachtet. Beispielsweise katalysiert Kupfer die Hydrolysereaktion der Kraftstoffkomponenten, in deren Folge Ameisensäure entsteht. Geeignete Additive oder Pufferlösungen zur Inhibierung der Hydrolyse befinden sich derzeit noch in der Testphase.

2.3 Gasförmige Kraftstoffe (Wasserstoff und Methan)

2.3.1 Wasserstoff

Wasserstoff als kohlenstofffreies, hochkalorisches Molekül steht bereits seit langem im Fokus der Energiewende im Verkehr.⁴⁹ Es konnte sich bis dato aufgrund des aufwändigen Handlings und der hohen Herstellungskosten nicht gegen die im Verkehrssektor etablierten Optionen durchsetzen. Dennoch wird Wasserstoff perspektivisch wieder eine zunehmende Bedeutung für den Transportsektor zugetragen, wenn es entweder direkt als Energieträger oder als Ausgangsstoff für gasförmige oder flüssige Kraftstoffe eingesetzt wird.

Die Anwendung von Wasserstoff als Kraftstoff erfolgt entweder in Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor oder mit Brennstoffzellen.⁵⁰ Während die Performance bei einem wasserstoffbetriebenen Verbrennungsmotor vergleichbar mit Dieselmotoren ist, kann diese bei Brennstoffzellenfahrzeugen um etwa 10 bis 20 % gesteigert werden. Beide Optionen emittieren am Fahrzeug durch den reinen Einsatz von Wasserstoff keine kohlenstoffhaltigen Treibhausgase und Schadstoffe wie CO₂ oder Partikel. Einzig bei der Anwendung von Wasserstoff im Verbrennungsmotor entstehen vereinzelte kohlenstoffhaltige Schadstoffe aus der Verbrennung des Motorenöls sowie stickstoffhaltige Schadstoffe (NO_x und N₂O). Brennstoffzellenfahrzeuge kommen hingegen vollständig ohne Schadstoffemissionen aus.

Technisch limitierend bei der Anwendung von Wasserstoff als Kraftstoff ist dessen geringe Dichte von 0,09 kg/m³ unter Standardbedingungen.⁵¹ Um entsprechend große Mengen an Wasserstoff im Fahrzeug bevorraten zu können, wird er entweder komprimiert, tiefkalt verflüssigt oder mittels flüssiger Trägermaterialien gespeichert. Aktuell sind vor allem Technologien mit Druckspeicherung bei 350 bar bzw. 700 bar verfügbar. Beide Varianten haben jedoch mit 3 MJ/l bzw. 5 MJ/l immer noch einen deutlich geringeren volumetrischen Energiegehalt als Dieselmotorkraftstoff (Diesel: 35 MJ/l). Volkswirtschaftlich sind die verschiedenen Konzepte zur direkten Nutzung von Wasserstoff im Transportsektor mit höheren Kosten als bei anderen erneuerbaren Kraftstoffoptionen verbunden.⁵² Dies ist vor allem getrieben durch den Investitionsbedarf am Fahrzeug (Tank und Brennstoffzellen bzw. Tank und Wasserstoffmotor) als auch in die Kraftstoffinfrastruktur, welche vollständig neu geschaffen werden muss.

Die Qualitätsanforderungen für die Anwendung von Wasserstoff im Straßenverkehr sind in der DIN EN 17124 definiert und diese wiederum ist in der 10. BImSchV verankert, welche die anwendbaren Kraftstoffqualitäten in Deutschland definiert.

⁴⁹ Mabanaft: Branchen-Glossar: Grüner Wasserstoff (H₂), www.mabanaft.com/de/news-info/branchen-glossar-energielexikon/gruener-wasserstoff-h2, (zuletzt aufgerufen am 8.12.2022)

⁵⁰ e-mobil BW GmbH (Hrsg.) (2021): Systemvergleich zwischen Wasserstoffverbrennungsmotor und Brennstoffzelle im schweren Nutzfahrzeug. Stuttgart, www.e-mobilbw.de

⁵¹ Schröder, J.; Naumann, K. (Hrsg.) (2022): Monitoring erneuerbarer Energien im Verkehr. Leipzig: DBFZ. 340 S. ISBN: 978-3-946629-82-5. DOI: 10.48480/19nz-0322, <https://www.dbfz.de/report-44>

⁵² FVV (Hrsg.) (2021): Zukünftige Kraftstoffe: FVV-Kraftstoffstudie IV. Frankfurt am Main, www.fvv-net.de

Nachhaltig kann grüner Wasserstoff z.B. elektrochemisch durch Wasserelektrolyse mit Strom aus erneuerbaren Quellen hergestellt und direkt im Straßenverkehr eingesetzt werden. Alternative Herstellungsrouten wie Plasmaverfahren sowie biogene und thermische Herstellungsprozesse werden aktuell beforscht.

Fact Sheet

Wasserstoff ist ein chemisches Element, dessen Eigenschaften und Risiken wohl bekannt sind. Entsprechend ist es in den verschiedenen Klassifikationssystemen von Stoffen eingetragen. Eine Registrierung nach der europäischen Chemikalienverordnung (REACH) ist unabhängig vom Herstellungsverfahren nicht notwendig.

Für die Anwendung von Wasserstoff im Verkehrssektor definiert die nationale Norm **DIN EN 17124** aktuell nur die notwendige Gasqualität von Protonenaustauschmembran-Brennstoffzellen für Straßenfahrzeuge innerhalb Deutschlands. Diese Norm (Ausgabe von Juli 2019) wird in der 10. BImSchV aufgeführt. Eine Anwendung als Kraftstoff wird seitens des Gesetzgebers folglich entsprechend ermöglicht. Perspektivisch müssen einerseits in der vorhandenen Norm konkrete Methoden zur Bestimmung der Qualitätsparameter definiert werden. Andererseits ist eine Ausweitung der Qualitätsbeschreibung auf die Anwendung in Verbrennungsmotoren empfehlenswert, um vor allem dem Schiffverkehr oder dem schweren Straßengüterverkehr neue Optionen zu ermöglichen. Die Definition von internationalen Vorgaben für die Luft- und Seeschifffahrt stehen ebenfalls noch aus, auch wenn bereits erste Schiffe mit Wasserstoff angetrieben werden.

Zur Erfüllung der RED II-Ziele kann strombasierter Wasserstoff herangezogen werden. Die regulatorischen Voraussetzungen hierzu werden durch den Delegated Act zum Strombezug (Art. 27 der RED) definiert, der am 13.02.2023 durch die EU-Kommission veröffentlicht wurde. Im einleitenden Kapitel »Anforderungen für eine erfolgreiche Markteinführung synthetischer Kraftstoffe – Regularien und Verordnungen« wird auf die damit verbundenen wesentlichen Herausforderungen eingegangen.

Die **Materialverträglichkeit** gegenüber Wasserstoff ist in speziell konzipierten Brennstoffzellenfahrzeugen oder Fahrzeugen mit Wasserstoffmotoren sowie der dafür notwendigen Infrastruktur gegeben.⁵³ Bekannte Phänomene wie Wasserstoffporosität oder Unverträglichkeiten gegenüber einzelnen Elastomeren sollten hier keine Rolle spielen. Die Umrüstungen bestehender Verbrennungsmotoren auf Wasserstoff ist aufgrund der damit verbundenen technischen Herausforderung nicht Bestandteil der aktuellen öffentlichen Diskussion. Insbesondere bei Brennstoffzellen ist eine hohe Reinheit des Wasserstoffs gefordert, um den Gradienten der Leistungsverluste über die Lebensdauer hinweg möglichst gering zu halten.⁵³

⁵³ e-mobil BW GmbH (Hrsg.) (2021): Systemvergleich zwischen Wasserstoffverbrennungsmotor und Brennstoffzelle im schweren Nutzfahrzeug. Stuttgart, www.e-mobilbw.de

Die Verunreinigungen im Wasserstoff verursachen bei den eingesetzten Edelmetall-Katalysatoren reversible und irreversible Schäden, die eine Katalysatoralterung beschleunigen. Dabei haben neben dem Herstellungsprozess vor allem die nachgelagerten Prozesse (Aufreinigung, Kompression oder Verflüssigung und Transport) wesentlichen Einfluss auf die Qualität. Bei Wasserstoffmotoren ist die Wasserstoffqualität hingegen von untergeordneter Bedeutung.

Die direkte Umwandlung von chemischer in elektrische Energie in Brennstoffzellen ermöglicht Vorteile in deren **Performance** gegenüber Wasserstoffmotoren, welche aufgrund des thermodynamischen Kreisprozesses zwangsläufigen Beschränkungen unterworfen sind.⁵³ Verluste werden in erster Linie nur durch die Versorgung von Nebenaggregaten im Brennstoffzellensystem verursacht. Insgesamt ist der Wirkungsgrad von Brennstoffzellenantrieben im realen Betrieb zwischen 10 bis 20 % höher einzuschätzen als bei vergleichbaren Wasserstoff- oder Dieselmotoren.

Die Reichweite von mit Wasserstoff betriebenen Fahrzeugen fällt in der Regel geringer als bei Fahrzeugen mit konventionellen Antrieben aus.⁵⁴ Der volumenbezogene Energiegehalt von Wasserstoff ist im Vergleich mit Diesel über 90 % bei einem Tankdruck von 350 bar, 85 % bei 700 bar bzw. 75 % bei flüssigem Wasserstoff geringer.

Für die Bewertung von Wasserstoff hinsichtlich dessen Einfluss auf die **Emissionen** muss zwischen den Anwendungsoptionen Brennstoffzelle (mit Elektromotor) und Verbrennungsmotor unterschieden werden.⁵³ Bei beiden Optionen entsteht Wasser als einziges Hauptprodukt der Energieumwandlung. Schadstoff- und Treibhausgasemissionen entstehen bei der Umwandlung von Wasserstoff in Brennstoffzellen nicht. Die bei Verbrennungsmotoren bekannten kohlenstoffhaltigen Verbrennungsprodukte CO₂, CO, Kohlenwasserstoffe sowie Partikel werden bei Wasserstoffmotoren in geringen Mengen nur über den Eintrag des Motorenöls in den Verbrennungsprozess erzeugt und sind dessen Funktion geschuldet. Nicht zu vernachlässigen sind die Emissionen von NO_x und N₂O bei Wasserstoffmotoren durch die Reaktion von Luftsauerstoff und -stickstoff bei hohen Verbrennungstemperaturen. Mit modernen Abgasnachbehandlungssystemen, bestehend aus Oxidations- und SCR-Katalysatoren, können Grenzwerte heutiger und voraussichtlich auch künftiger Emissionsgesetzgebungen unterschritten werden.

Die Emissionen entlang der Bereitstellungskette werden maßgeblich durch die Produktion von Wasserstoff getrieben und sind insbesondere bei der Nutzung von grünem Wasserstoff auf einem geringen Niveau.

⁵⁴ Schröder, J.; Naumann, K. (Hrsg.) (2022): Monitoring erneuerbarer Energien im Verkehr. Leipzig: DBFZ. 340 S. ISBN: 978-3-946629-82-5. DOI: 10.48480/19nz-0322, <https://www.dbfz.de/report-44>

Fazit

Erneuerbarer Wasserstoff kann über verschiedene strom- oder biomassebasierte Verfahren hergestellt werden. Etabliert sind vor allem die alkalische und die Protonenaustauschmembran-Elektrolyse, wenn auch mit geringen verfügbaren Kapazitäten verbunden. Wasserstoff ist als Kraftstoff technisch und regulatorisch etabliert und kann als Energieträger in Brennstoffzellen für Straßenfahrzeuge eingesetzt werden. Eine Weiterentwicklung dieser Regularien für die Anwendung in nichtstraßengebundenen Fahrzeugen oder in Verbrennungsmotoren steht noch aus. Die ökologische Belastung durch Treibhausgas- und Schadstoffemissionen ist bei der Verwendung von grünem Wasserstoff sehr gering. Brennstoffzellenfahrzeuge weisen zusätzlich einen ca. 10 bis 20 % höheren Gesamtwirkungsgrad auf als etablierte Verbrennungsmotoren. Jedoch steht dem der technische als auch volkswirtschaftliche Gesamtaufwand einer Etablierung von Wasserstoff als Kraftstoff und der dafür notwendigen Infrastruktur entgegen.

2.3.2 Methan

Methan ist unter Normalbedingungen ein farb- und geruchloses sowie brennbares Gas.^{55, 56} In Kombination mit Luft bildet es ein extrem explosives Gemisch. Methan wird vorwiegend als Heizgas zur Wärmebereitstellung und zum Betrieb von Verbrennungsmotoren verwendet. Auf Grund der geringen Dichte von $0,72 \text{ kg/m}^3$ wird Methan als Kraftstoff – unabhängig davon, ob erneuerbar oder nicht - entweder in komprimierter oder tiefkalt verflüssigter Form bereitgestellt. Komprimiertes Methan (Compressed Natural Gas – CNG) wird bei einem Druckniveau von 200 bis 250 bar und verflüssigtes Methan (Liquefied Natural Gas – LNG oder Liquefied Biomethane – LBM) bei Temperaturen von -162 °C bis -150 °C und einem Druckniveau bis 18 bar gespeichert. Verflüssigtes Methan weist dabei einen deutlich höheren Energiegehalt pro Volumeneinheit als komprimiertes Methan auf (CNG: 9 MJ/l , LNG: 23 MJ/l und Diesel: 35 MJ/l). Um unbemerktes Ausströmen zu vermeiden, wird bei der Verwendung von gasförmigem Methan eine Odorierung beigefügt.

Methan wird in Form von LNG als kurz- bis mittelfristig verfügbare Kraftstoffoption im schweren Straßengüterverkehr bzw. in der Schifffahrt diskutiert. Aktuell findet es vor allem als CNG Anwendung bei Pkws und in Bussen des öffentlichen Personennahverkehrs. Methan-Diesel-Motoren sind dabei fremdgezündeten Gasmotoren aufgrund des besseren Wirkungsgrades technisch überlegen. Mit der Verwendung von Methan im Verbrennungsmotor können Luftschadstoffe wie Partikelemissionen, Stickoxide und Nicht-Methan-Kohlenwasserstoffe im Vergleich zu den etablierten Mineralölkraftstoffen deutlich reduziert werden. Gleichzeitig liegt ein besonderes Augenmerk auf Methan selbst, welches einerseits ein besonders klimaschädliches Gas ist und andererseits entlang der gesamten Versorgungskette (Produktion, Verteilung, Nutzung) emittiert wird. Die THG-Bilanz von erneuerbarem Methan ist aufgrund des geschlossenen Kohlenstoffkreislaufs und des vorteilhaften C:H-Verhältnisses im Vergleich zu langkettigen Kohlenwasserstoffen deutlich verbessert.

Die Qualitätsanforderungen für die Anwendung von Methan als CNG bzw. LNG sind in der DIN EN 16723-2 definiert und diese wiederum ist in der 10. BImSchV verankert. Entsprechend darf Methan in Deutschland als Reinkraftstoff oder Gemisch an öffentlichen Tankstellen verkauft werden.

Methan kann nachhaltig durch PtG-Prozesse aus Synthesegas hergestellt (Sabatier-Prozess) oder durch Fermentation in Biogasanlagen gewonnen werden. Dieses synthetische bzw. biogene Methan ist chemisch identisch mit fossilem Methan (Hauptkomponente des Erdgases) und kann diesem daher problemlos beigemischt werden bzw. dieses vollständig ersetzen.

⁵⁵ Mabanaf: Branchen-Glossar: Erdgas (Methan), www.mabanaft.com/de/news-info/branchen-glossar-energielexikon/erdgas-methan-ch4, (zuletzt aufgerufen am 8.12.2022)

⁵⁶ Mabanaf: Branchen-Glossar: LPG (Flüssiggas), www.mabanaft.com/de/news-info/branchen-glossar-energielexikon/lpg-liquefied-petroleum-gas-autogas-fluessiggas, (zuletzt aufgerufen am 8.12.2022)

Fact Sheet

Methan unterliegt als Stoff der **REACH-Registrierung** und ist entsprechend in der ECHA-Datenbank unter der EC-Nr. 200-812-7 aufgeführt. Für Biomethan, welches mittels der anaeroben Fermentation hergestellt wird, liegen Ausnahmeregelungen von der Registrierungspflicht vor. Für synthetisches (strombasiertes) Methan gibt es für Produktionsprozesse mit mehr als 1 t/a aktuell keine Ausnahmeregelung. Eine Registrierung steht ebenfalls noch aus.

Für die Anwendung von Methan im Straßenverkehr gibt in Deutschland die Norm **DIN EN 16723-2** (»Erdgas und Biomethan zur Verwendung im Transportwesen und Biomethan zur Einspeisung ins Erdgasnetz«) die notwendige Gasqualität vor. Eine Beimischung von Biomethan zu Erdgas ist dabei bis zu 100 % möglich. Strombasiertes bzw. synthetisches Methan wird in der Norm nicht explizit erwähnt. Es ist perspektivisch zu überlegen, ob eine Anpassung der Norm hinsichtlich des zulässigen Wasserstoffgehalts notwendig wird. Das in der Norm geforderte Odoriermittel zur Geruchserkennung von Leckagen wird bei LNG aus technischen Gründen nicht beigefügt. Auch in der Seeschifffahrt wurden bereits Anforderungen an die Nutzung von Methan bzw. im Speziellen an LNG durch die internationale Seeschifffahrts-Organisation IMO gesetzt.

Die Norm DIN EN 16723-2 wird mit der Ausgabe vom Oktober 2017 in der 10. BImSchV aufgeführt. Eine Anwendung von synthetischem Methan als CNG oder LNG ist entsprechend bereits heute zulässig. Die **Verordnung** verweist im Konkreten auf die Gasbeschaffenheit nach Tabelle D.1 der DIN EN 16723-2. Auch die weiterführende Untersetzung bei der Anwendung von Methan als Kraftstoff ist in zahlreichen technischen Regeln etabliert.

Zur Erfüllung der RED II-Ziele kann strombasiertes Methan mit herangezogen werden. Die regulatorischen Voraussetzungen hierzu werden durch den Delegated Act zum Strombezug (Art. 27 der RED) definiert, der am 13.02.2023 durch die EU-Kommission veröffentlicht wurde. Im einleitenden Kapitel »Anforderungen für eine erfolgreiche Markteinführung synthetischer Kraftstoffe – Regularien und Verordnungen« wird auf die damit verbundenen wesentlichen Herausforderungen eingegangen.

Die vorhandene Erdgas-Infrastruktur (Erdgasnetz, LNG-Verteilnetz) ist vollständig kompatibel mit Methan. Bei Fahrzeugen, die für den Betrieb von CNG und LNG ausgelegt sind, ist die **Materialverträglichkeit** ebenfalls vollständig gegeben. Vor allem Benzinmotoren können durch entsprechende Hardware (u.a. Tank, Einspritzventil und Steuergerät) technisch auf den Betrieb von Methan umgerüstet werden. Ggf. treten bei einzelnen umgebauten Motoren Materialunverträglichkeiten auf Grund der hohen Verbrennungstemperaturen im Brennraum auf.

Die **Performance** (Wirkungsgrad) von Methan-betriebenen Verbrennungsmotoren ist grundlegend vergleichbar mit Benzin- und Dieselmotoren. Das HPDI-Motorenkonzept (Hochdruckeinblasung von Methan in einen Verbrennungsmotor mit Selbstzündung)

hat hierbei eine höhere Effizienz als monovalente und bivalente Verbrennungsmotoren mit Fremdzündung. Bei den monovalenten Motoren kann die Effizienz auf Grund der hohen Klopfestigkeit (Oktanzahl) von Methan im Vergleich zu den bivalenten Motoren weiter gesteigert werden.

Die Reichweite von Methan-betriebenen Fahrzeugen ist geringer als bei Fahrzeugen mit konventionellen Antrieben, da die volumenbezogenen Energiegehalte von Methan als CNG und LNG mit ca. 25 % bzw. 55 % gegenüber Diesel deutlich geringer sind.

Erneuerbares Methan hat das Potenzial, einen wichtigen Beitrag zur Reduktion von **CO₂-Emissionen** im Verkehr zu leisten. Zum einen ist in diesem Zusammenhang die positive CO₂-Bilanz bei der Herstellung von erneuerbarem Methan zu nennen. Zum anderen werden durch das vorteilhafte C:H-Verhältnis die während der Verbrennung erzeugten CO₂-Emissionen im Vergleich zu konventionellen Diesel- und Benzinmotoren reduziert bzw. ausgeglichen, trotz bestehender Wirkungsgradnachteile bei den verschiedenen Methan-Motorenkonzepten. Bei den **Luftschadstoffen** können die Partikelemissionen im Verbrennungsabgas bei Anwendung von Methan deutlich reduziert werden. Die Emissionen von Nicht-Methan-Kohlenwasserstoffen (NMHC) und Stickoxiden (NO_x) sind tendenziell geringer. Methan selbst ist bei den Luftschadstoffen die kritischste Komponente, da es als besonders klimaschädliches Gas ein Vielfaches des Treibhausgaspotenzials von CO₂ aufweist. Methan wird sowohl in der Versorgungskette (Produktion bis Verteilung) als auch im Fahrzeug (Verbrennungsabgas und Blow-By) freigesetzt. Unabhängig von den zum Teil positiven Eigenschaften von Methan müssen moderne Abgasnachbehandlungssysteme verwendet werden, um aktuelle Abgasvorgaben zu erfüllen.

Die typischen schwefelhaltigen Odoriermittel sind auf ein notwendiges Minimum zu reduzieren bzw. sollten perspektivisch für schwefelfreie Alternativen weichen.

Fazit

Methan ist als Kraftstoff technisch und regulatorisch etabliert und kann in jeglichem Mischungsverhältnis mit Erdgas als Energieträger für Verbrennungsmotoren eingesetzt werden. Methan-betriebene Verbrennungsmotoren, welche mit dem technisch aufwendigen HPDI-Verfahren arbeiten, sind aufgrund der höheren Effizienz bei Neufahrzeugen zu bevorzugen. Bei der Benzin-betriebenen Pkw-Bestandsflotte ist eine Umrüstung auf Methan technisch möglich. Die Verwendung von erneuerbarem Methan erlaubt die Reduzierung von CO₂-Emissionen und Luftschadstoffen, wobei die besonders klimaschädlichen Methanemissionen bei der Schadstoffvermeidung im Fokus stehen müssen. Bereits heute ist erneuerbares Methan im Markt verfügbar, welches mittels Vergärung organischer Ressourcen hergestellt wird. Die Produktion via katalytischer und biologischer Methanisierung wird währenddessen vor allem aufgrund der fehlenden Verfügbarkeit von nachhaltig erzeugtem Synthesegas nur in ausgewählten Demonstrationsvorhaben adressiert.

2.3.3 Hythane (Methan-Wasserstoff-Gemisch)

Als Hythane werden Gemische aus Methan und Wasserstoff mit einem typischen Wasserstoffanteil von etwa 10 bis 30 Vol.% bezeichnet. Neben dem Begriff Hythane wird zusätzlich der Begriff HCNG als mit Wasserstoff angereichertes CNG genutzt. Hythane sind unter Normalbedingungen farb- und geruchlose sowie brennbare Gase. In Kombination mit Luft sind sie zusätzlich extrem explosiv. Hythane finden aktuell im Verkehrssektor keine Anwendung, könnten jedoch bei einer künftigen Beimischung von Wasserstoff ins Erdgasnetz zur Verfügung stehen. Auf Grund der geringen Dichten von Methan ($0,72 \text{ kg/m}^3$) und Wasserstoff ($0,09 \text{ kg/m}^3$) kann Hythane nur in komprimierter Form als Kraftstoff bereitgestellt werden. Vergleichbar mit komprimiertem Methan wird Hythane bei einem Druckniveau von 200 bis 250 bar gespeichert. Je mehr Wasserstoff dem Methan zugefügt wird, desto stärker reduziert sich der volumenbezogene Energiegehalt (CNG mit 20 Vol.% H_2 : 8 MJ/l ; CNG ohne H_2 : 9 MJ/l ; Diesel: 35 MJ/l). Eine Verflüssigung von Hythane zur weiteren Steigerung der volumetrischen Energiedichte ist bisher nicht angedacht. Um unbemerktes Ausströmen zu vermeiden, muss dem Gas eine Odorierung beigefügt werden.

Hythane kann eine sinnvolle Alternative zu den etablierten Energieträgern in speziellen Anwendungsbereichen wie kommunalen Betrieben oder Großmotoren für stationäre Anwendungen darstellen. Es können Verbrennungsmotoren mit Selbst- oder Fremdzündung angewendet werden. Mit der Verwendung von Hythane im Verbrennungsmotor können Luftschadstoffe wie Partikelemissionen, Stickoxide und Nicht-Methan-Kohlenwasserstoffe im Vergleich zu den etablierten Mineralölkraftstoffen und zu Methan reduziert werden. Allerdings liegt ein besonderes Augenmerk auf Methan als Hauptbestandteil des Gemisches, welches einerseits ein besonders klimaschädliches Gas ist und andererseits entlang der gesamten Versorgungskette (Produktion, Verteilung, Nutzung) emittiert wird. Die CO_2 -Bilanz von erneuerbarem Hythane ist aufgrund des geschlossenen Kohlenstoffkreislaufs und des vorteilhaften C:H-Verhältnisses im Vergleich zu langkettigen Kohlenwasserstoffen deutlich verbessert.

Die Qualitätsanforderungen für die Anwendung von Methan mit geringer Beimischung von Wasserstoff sind in der DIN EN 16723-2 definiert; die von Wasserstoff in der DIN EN 17124. Beide sind wiederum in der 10. BImSchV verankert.

Fact Sheet

Hythan als Gemisch aus Methan und Wasserstoff unterliegt nicht der **REACH-Registrierung**, entsprechend wird es auch nicht in der ECHA-Datenbank aufgeführt. Für Wasserstoff sowie Biomethan aus der anaeroben Fermentation liegen Ausnahmeregelungen von der Registrierungspflicht vor. Im Gegensatz dazu gelten keine Ausnahmeregelungen für synthetisch erzeugtes (strombasiertes) Methan mit einer Kapazität von mehr als 1 t/a. Eine Registrierung steht noch aus.

Ein Methan-Wasserstoff-Gemisch mit maximal 2 Vol.% Wasserstoffanteil ist bereits heute in der **DIN EN 16723-2** (»Erdgas und Biomethan zur Verwendung im Transportwesen und Biomethan zur Einspeisung ins Erdgasnetz«) definiert. Für die Anwendung von Hythanen, welche durch höhere Wasserstoffanteile charakterisiert sind, liegen keine separaten Kraftstoffnormen vor. Wasserstoff ist durch die **DIN EN 17124** genormt. Beide Normen werden in der 10. BImSchV als zulässige Kraftstoffe erlaubt. Eine Anwendung von Hythan, in dem die beiden Gase in zwei separaten Fahrzeugtanks gespeichert und das Methan-Wasserstoff-Gemisch erst vor der Verbrennung im Fahrzeug erzeugt wird (On-Board Blending), ist damit regulatorisch möglich.

Zur Erfüllung der RED II-Ziele können strombasiertes Methan und Wasserstoff herangezogen werden. Die regulatorischen Voraussetzungen hierzu werden durch den Delegated Act zum Strombezug (Art. 27 der RED) definiert, der am 13.02.2023 durch die EU-Kommission veröffentlicht wurde. Im einleitenden Kapitel »Anforderungen für eine erfolgreiche Markteinführung synthetischer Kraftstoffe – Regularien und Verordnungen« wird auf die damit verbundenen wesentlichen Herausforderungen eingegangen.

Die **Materialverträglichkeit** sollte bei den speziell für diese Anwendung entwickelten Motorenkonzepten bereits gewährleistet und somit unkritisch sein. Ggf. können auch LNG- oder CNG-geeignete Fahrzeug auf die Anwendung von Hythan umgerüstet werden. In diesem Fall könnten eventuell Unverträglichkeiten aufgrund hoher Brennraumtemperaturen sowie durch Wasserstoffporosität vorliegen.

Die **Performance** (Wirkungsgrad) von Hythan-betriebenen Gasmotoren ist grundlegend vergleichbar mit Benzin- und Dieselmotoren. Es besteht jedoch weiteres Optimierungspotenzial aufgrund von Eigenschaften wie der hohen Klopffestigkeit und der hohen Flammengeschwindigkeit des Gases. Hingegen ist die Reichweite von Hythan-betriebenen Fahrzeugen bei vergleichbaren Tankvolumina deutlich geringer als bei Fahrzeugen mit Diesel- oder Benzinmotoren, da der volumenbezogene Energiegehalt selbst von komprimiertem Hythan deutlich geringer ausfällt.

Erneuerbares Hythan kann einen Beitrag zur Reduktion von CO₂-Emissionen im Verkehr leisten. Zum einen ist in diesem Zusammenhang die positive CO₂-Bilanz bei der Herstellung von erneuerbarem Wasserstoff und Methan zu nennen. Zum anderen werden durch das vorteilhafte C:H-Verhältnis die während der Verbrennung erzeugten CO₂-Emissionen im Vergleich zu konventionellen Diesel- und Benzinmotoren reduziert. Bei den Luftschadstoffen können mit Hythan Schadstoffkomponenten wie Partikelemissionen, Stickoxide und Nicht-Methan-Kohlenwasserstoffe im Verbrennungsabgas im Vergleich zu den etablierten Kraftstoffen reduziert werden. Methan als Bestandteil des Kraftstoffes selbst ist dabei die kritischste Komponente, da es ein besonders klimaschädliches Gas mit einem Vielfachen des Treibhausgaspotenzials von CO₂ ist und sowohl in der Versorgungskette (Produktion bis Verteilung) als auch im Fahrzeug (Verbrennungsabgas und Blow-By) freigesetzt wird. Inwiefern die positiven Eigenschaften von Hythan einfachere Abgasnachbehandlungssysteme ermöglichen, um aktuelle Abgasstandards zu erfüllen, kann aufgrund fehlender Datenlage nicht abschließend beantwortet werden.

Bei der Odorierung des Gases sind die typischen schwefelhaltigen Odoriermittel auf ein notwendiges Minimum zu reduzieren und sollten perspektivisch schwefelfreien Alternativen weichen.

Fazit

Hythan ist als Kraftstoff technisch und regulatorisch nicht etabliert. Insbesondere in der Anwendung besteht noch erheblicher Forschungsbedarf, inwiefern die vorhandenen Potenziale des Kraftstoffs hinsichtlich Emissionen und Performance gehoben werden können. Verbrennungsmotoren, die jegliches Mischungsverhältnis zwischen reinem Wasserstoff und reinem Methan nutzen, können eine naheliegende Weiterentwicklung von speziellen Hythan-Konzepten sein. Regulatorisch sind zumindest die beiden Einzelkomponenten Wasserstoff und Methan bereits definiert.



2.3.4 Kurzübersicht: Ammoniak in der Schifffahrt

Ammoniak (NH_3) wird klassisch großtechnisch über das Haber-Bosch-Verfahren hergestellt und ist eine der wichtigsten Grundchemikalien der chemischen Industrie.⁵⁷ Bislang werden rund 80 % der weltweiten Produktion von Ammoniak als Grundchemikalie für die Düngemittelproduktion eingesetzt und nur etwa 20 % für andere Anwendungsbereiche. Da Ammoniak leicht zu lagern und bereits heute ein weltweit verschifftes Gut ist, wird es als kostengünstiger flüssiger Energieträger für die Sektoren Transport und Energieerzeugung immer attraktiver. Zudem hat Ammoniak im Vergleich zu Wasserstoff eine deutlich höhere Energiedichte. Zwei Konzepte sind daher aktuell im Fokus der Anwendung von Ammoniak im Transport- und Energiesektor: Einerseits kann Ammoniak als sauberer Wasserstoff-Speicher, -Träger und -Lieferant dienen, wenn es am Zielort über Reformierung wieder in Wasserstoff und Stickstoff gespalten wird. Andererseits kann Ammoniak aber auch direkt als Treibstoff genutzt werden. Daher ist Ammoniak auch als alternativer Kraftstoff für die maritime Schifffahrt im Gespräch.

Obwohl Ammoniak mit einer Jahresproduktion von 220 Mio. t (in 2020)⁵⁸ bereits eine Massenware ist, müssten die bestehenden Produktionskapazitäten deutlich erweitert werden, um auch den Bedarf als alternativen Kraftstoff für die Schifffahrt zu decken. Als Vergleich: Für die gesamte Fernschifffahrt würde in etwa das 3-fache der heutigen Jahresproduktion benötigt.⁵⁹ Auch müsste die bestehende und auf die Chemieindustrie abgestimmte Ammoniak-Infrastruktur an den Häfen ausgebaut und vor allem um eine Tankinfrastruktur erweitert werden.

Als Grundchemikalie der Chemie ist für Ammoniak ein Eintrag in der REACH-Datenbank (siehe Appendix) bereits vorhanden. Neue Herstellungsrouten könnten sich somit diesem anschließen, was eine Vereinfachung der Registrierung bedeuten würde. Normen oder andere Vorschriften, welche den Einsatz als Schifffahrtskraftstoff regeln, existieren bislang hingegen nicht, befinden sich aber in der Diskussion. Direkte Verordnungen, die Mindestquoten für den Einsatz alternativer bzw. strombasierter Kraftstoffe in der Schifffahrt vorgeben, gibt es derzeit nicht, werden aber im Rahmen der Fuel EU Maritime diskutiert. Grundsätzlich ist anzunehmen, dass grüner Ammoniak aus strombasiertem grünem Wasserstoff als RFNBO anrechnungsfähig ist.

Da es sich bei Ammoniak um einen bei Raumtemperatur gasförmigen Stoff handelt, ist ein Einsatz in verflüssigter Form (bei Atmosphärendruck sind -33°C notwendig) am wahrscheinlichsten, um eine größere Energiedichte zu erzielen. Der Aufwand für die Verflüssigung ist prinzipiell geringer als bei LNG (hier sind etwa -160°C notwendig). Alle Charakteristiken des Ammoniaks zusammengenommen, zeigen sich keine **Fit-for-Purpose-Eigenschaften**, die einen direkten Einsatz als Drop-in-Kraftstoff

⁵⁷ Mabanaf: Branchen-Glossar: Ammoniak & Grünes Ammoniak, www.mabanaf.com/de/news-info/branchen-glossar-energielexikon/ammoniak-gruenes-ammoniak, (zuletzt aufgerufen am 8.12.2022)

⁵⁸ Sven Kohnke (YARA Brunsbüttel): The color of Ammonia, 2. Lausitzer Fachkonferenz, 11.11.2021 (Cottbus & digital), <https://www.klimaschutz-industrie.de/newsroom/news/2-lausitzer-fachkonferenz-klimaneutrale-industrie-2021-erfolgreich-beendet/> (zuletzt aufgerufen am 4.5.2023)

⁵⁹ Deutsch-Norwegische Handelskammer: Partnerschaft zur Elektrifizierung der Ammoniakanlage von Yara in Norwegen, <https://handelskammer.blog/statkraft-yara-and-aker-horizont-enter-partnership-on-green-hydrogen-and-ammonia-in-norway/> (zuletzt aufgerufen am 19.5.2022)

ermöglichen. Eine umfassende Umrüstung ist v.a. aufgrund der geringen volumetrischen Energiedichte (der Tank müsste für die gleiche Reichweite in etwa um ein Vierfaches größer sein als der von konventionellem Schiffskraftstoffen), der schlechten Materialverträglichkeit (Ammoniak ist korrosiv) und der Toxizität notwendig. Auch ein kompletter Schiffsneubau kommt hier in Betracht.

Hinsichtlich der Schadstoffemissionen bietet Ammoniak als kohlenstofffreier Kraftstoff den großen Vorteil, dass bei der Anwendung keine klimaschädlichen CO₂-Emissionen entstehen. Auch weitere Kohlenstoff-haltige Emissionen, wie insbesondere Rußpartikel und unverbrannte Kohlenwasserstoffe, ließen sich mit der Anwendung von Ammoniak vermeiden. Analog zu allen anderen synthetischen Kraftstoffen werden dann auch keine SO_x-Emissionen ausgestoßen. Andererseits sind ein höherer Anteil an NO_x-Emissionen und die Bildung von Lachgas (N₂O) zu erwarten. Da die Klimawirksamkeit von N₂O um den Faktor 273 größer ist als die von CO₂ ist eine Abgasreinigung unabdingbar. Aus anderen Anwendungsfeldern wie auch der Nutzung gängiger Kraftstoffe sind verschiedene Möglichkeiten der Abgasnachbehandlung bekannt. Inwieweit sich diese Systeme allerdings auch direkt auf die Verbrennung von Ammoniak in Schiffsmotoren übertragen lassen, ist bislang noch Gegenstand der Forschung. Ammoniak selbst, welches ebenfalls als Schadstoff während der Verbrennung emittiert werden kann, ist human- und umwelttoxisch, zu seiner direkten Wirkung in der Atmosphäre gibt es bislang keine hinreichenden Informationen.

Aufgrund der Toxizität von Ammoniak zeichnet sich bereits heute ab, dass ein Einsatz wohl nur für Frachtschiffe in Frage kommt. Hier kann die Besatzung des Schiffs für den Havariefall hinsichtlich Eigenschutz und Gegenmaßnahmen geschult werden. Auch muss geklärt werden, inwieweit ein mit Ammoniak betriebenes Schiff auch in Küstennähe und auf Flüssen fahren kann bzw. darf, oder ob die Routen hier auf die Hochseeschifffahrt beschränkt werden (müssen). Dabei werden für die Anwendung als Schiffskraftstoff sowohl unterschiedliche Motorenkonzepte mit Mono-, Dual- und Multi-Fuel-Motoren als auch die Anwendung in einer Brennstoffzelle (langfristige Option) diskutiert. Langfristig würde der Einsatz von Brennstoffzellen ein Potenzial zu deutlich geringeren Emissionen bewirken. Bis diese Technologie jedoch für den Antrieb großer Frachtschiffe ausgereift ist, wird es deutlich länger dauern als bei der Entwicklung geeigneter Motoren.

Gegenwärtig ist noch kein mit Ammoniak betriebenes Schiff im Einsatz. Es gibt hierzu mehrere Forschungsvorhaben, in welchen die unterschiedlichen Technologieoptionen betrachtet werden – jeweils mit dem Ziel, in den nächsten Jahren (das erste bereits ab 2023) ein Ammoniak-Schiff zu betreiben.^{60,61,62}

⁶⁰ ShipFC-Projekt: Hochtemperatur-Brennstoffzelle mit Ammoniak für Schiffe, <https://www.internationales-verkehrswesen.de/shipfc-projekt-hochtemperatur-brennstoffzelle-mit-ammoniak-fuer-schiffe/> (zuletzt aufgerufen am 19.5.2022)

⁶¹ Viridis Bulk Carriers, <https://www.viridiskarriers.no/fleet-technology> (zuletzt aufgerufen am 19.5.2022)

⁶² Wärtsilä: Partners join forces to speed up ammonia engine development, <https://www.off-shore-energy.biz/wartsila-partners-join-forces-to-speed-up-ammonia-engine-development> (zuletzt aufgerufen am 19.5.2022)



AUSBLICK



Ausblick

Synthetische nachhaltige Kraftstoffe sind grundlegend von entscheidender Bedeutung für die Klimaneutralität im Verkehr – insbesondere in schwer elektrifizierbaren Bereichen wie der Luft- und Schifffahrt, im schweren Straßengüterverkehr und in schweren land- und forstwirtschaftlichen Maschinen, darüber hinaus allerdings auch für die Versorgung der Bestandsflotte. Da gegenwärtig nahezu keine Produktionskapazitäten vorhanden sind, könnte ein Markthochlauf zunächst mit einer Beimischung zu den fossilen Kraftstoffen erfolgen, somit zumindest einen Teilbeitrag zur Treibhausgasreduzierung leisten und bereits jetzt den Ausbau der Produktionskapazitäten fördern.

Die gängigsten synthetischen Kraftstoffsubstitute wie paraffinischer Diesel, Methanol-to-Gasoline, Wasserstoff und Methan sind heute bereits genormt bzw. benötigen keine separate Normung und verfügen über eine REACH-Registrierung. Insbesondere für die sauerstoffhaltigen Kraftstoffe sind jedoch weitere Normungsaktivitäten auf europäischer Ebene (CEN) anzustreben und auf nationaler Ebene (DIN) fortzusetzen, um eine gemeinsame Basis für die heutigen Forschungs- und Entwicklungsarbeiten und für die spätere Anwendung schaffen zu können. Gleiche Maßnahmen sind für die synthetischen Optionen wie Methanol, Methanol-to-Jet-Kerosin oder Ammoniak auf internationaler Ebene bei ASTM und ISO für die Anwendung als Flug- oder Schiffstreibstoff erforderlich. Auf nationaler Ebene müssten zusätzlich die Vorgaben der Richtlinien in nationales Recht umgesetzt und speziell in Deutschland die 10. BImSchV für neue Kraftstoffoptionen wie paraffinischen Dieselmethanolkraftstoff ausgeweitet werden. Zuletzt hat der Bundestag die Bundesregierung aufgefordert, die 10. BImSchV zeitnah dahingehend anzupassen, dass auch Kraftstoffe, die der DIN EN 15940 entsprechen, vollumfänglich zulässig sind.⁶³ Hierdurch ließe sich synthetischer Diesel künftig auch in Reinform an öffentlichen Tankstellen vertreiben. Eine regierungsseitige Bestätigung und ein Zeitplan zur Umsetzung liegen derzeit noch nicht vor.

Für eine großflächige Markteinführung müssen gleichzeitig weitere regulatorische Randbedingungen sowohl für die Produktion als auch für die Anwendung synthetischer Energieträger sichergestellt werden. Dafür gilt es in erster Linie auf europäischer Ebene wesentliche Aspekte zu konkretisieren:

⁶³ Deutscher Bundestag, Drucksache 20/5830 (2023) <https://dserver.bundestag.de/btd/20/058/2005830.pdf>

Herausfordernd ist insbesondere noch der regulatorische Rahmen für die Produktion erneuerbar erzeugten Wasserstoffs, welcher einen essentiellen Baustein in der Wertschöpfungskette synthetischer Kraftstoffe darstellt. Besonders kritisch ist dabei der Delegierte Rechtsakt zu Artikel 27 der RED II. Die darin getroffenen Regelungen zur Zusätzlichkeit sowie zur zeitlichen und geografischen Korrelation der Stromerzeugung für die Herstellung des klimaneutralen Wasserstoffs sind in der Umsetzung von Projekten kritisch zu bewerten, da damit der Bezug von erneuerbarem Strom aus dem Netz ausgeschlossen wird.

Ebenfalls herausfordernd ist der Delegierte Rechtsakt zur THG-Methodologie (Artikel 28 der RED II) in Hinblick auf die Verwendung von CO₂ aus Industriepunktquellen, insbesondere da diese auf Fälle begrenzt sind, die im ETS oder in einem vergleichbaren CO₂-Abgabensystem gelistet werden. Die Nutzung dieser Quellen ist bis 2036 (aus Stromerzeugung) bzw. 2041 (aus anderen Industrieprozessen) begrenzt. Die klimapolitisch favorisierten Kohlenstoffquellen sind jedoch sehr energieintensiv bzw. noch nicht technologisch ausgereift (Direct Air Capture), oder nur begrenzt verfügbar (Nutzung von Biomasse und Abfallströmen). Die Verfügbarkeit einer konstanten Kohlenstoffquelle ist allerdings ein wichtiges Kriterium für die Wahl des Produktionsstandortes und schränkt unter den aktuellen Bedingungen die Technologieentwicklung und somit den Markthochlauf ein.

Positiv zu bewerten ist, dass in den Entwürfen der überarbeiteten Erneuerbaren-Energien-Richtlinie (RED III) für den Verkehr im Allgemeinen sowie in den Verordnungen ReFuelEU Aviation für den Flugverkehr und FuelEU Maritime für die Schifffahrt dezidierte Unterquoten für RFNBOs bereits Bestandteil der Gesetzgebung sind. Aufgrund der aktuell noch laufenden Trilogverhandlungen stehen die konkreten Quoten bei Finalisierung dieses Berichtes jedoch noch nicht zur Verfügung.

Trotz aller Hürden fördern aktuelle Pilotprojekte bereits die Sichtbarkeit von synthetischen Kraftstoffen und ermöglichen gleichzeitig einen Erkenntniszugewinn für die Technologieoptimierung nachfolgender Anlagengenerationen sowie die Systemintegration der synthetischen Kraftstoffe in bestehende oder neu zu schaffenden Infrastrukturen. Beispiele relevanter Pilotprojekte sind u.a.

- › die »Haru Oni«-Pilotanlage zur Produktion von Methanol und Folgeprodukten wie MtG-Benzin von HIF Global in Chile (<https://www.hifglobal.com/hif-chile>),
- › die »George Olah Renewable Methanol Plant« von Carbon Recycling International in Island (<https://www.carbonrecycling.is/project-goplant>),
- › die »HØST PtX Esbjerg«-Pilotanlage zur nachhaltigen Produktion von Ammoniak mit potenziellem Einsatz in der Schifffahrt (<https://hoestptxesbjerg.dk/about-ptx/>),

- › die »E-Fuel1«-Anlage von Nordic Electrofuel AS zur Synthese von Sustainable Aviation Fuel (SAF) (<https://nordicelectrofuel.no/what-we-do/>),
- › das IPCEI (Important Projects of Common European Interest) »HyKero« zur Produktion von grünem PtL-Kerosin, grünem Naphtha und grünem Wasserstoff der EDL Anlagenbau Gesellschaft mbH in Böhlen-Lippendorf (<https://www.poerner.at/media/pressemitteilung/news/gruenes-licht-fuer-hykero>),
- › die Ineratec-Pionieranlage zur Erzeugung von PtL-Kraftstoffen im Industriepark Höchst im Rahmen des Projektes »RePoSe« (<https://www.ineratec.de/de/news/34-mio-euro-foerderzusage-fuer-e-fuel-projekt-repose-hessen>),
- › die »The Next Gate«-Pilotanlage zur Produktion von Fischer-Tropsch-Diesel und Naphtha in Hamburg (<https://www.mabanaft.com/de/news-info/aktuelles-pressemitteilungen/news-detail/the-next-gate-zukunftsweisendes-demonstrationsprojekt-in-hamburg/>)
- › die »Technologie-Plattform PtL« (TPP) des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt (DLR) (<https://www.dlr.de/de/aktuelles/nachrichten/2023/01/technologie-plattform-ptl-dlr-forscht-fuer-industrielle-produktion>)
- › oder die MtG-Pilotanlage der Chemieanlagenbau Chemnitz GmbH (CAC) im Rahmen des Verbundprojektes C3-Mobility (<https://www.cac-synfuel.com/de/news/bibliothek/details/default-8d8508code-1>)

Darüber hinaus haben sich eine Reihe von Forschungs- und Entwicklungsprojekten – beispielsweise auch innerhalb der Förderinitiative Energiewende im Verkehr oder im Projekt NAMOSYN – in den vergangenen Jahren mit der Anwendung synthetischer Kraftstoffe (insbesondere bzgl. Materialverträglichkeit, Performance und Emissionsverhalten) auseinandergesetzt. Dabei wurde eine Vielzahl an Erkenntnissen gewonnen, von denen insbesondere bei den Oxygenaten die Materialverträglichkeit in Bestandsfahrzeugen und die Bildung einzelner Schadstoffkomponenten sich als herausfordernd darstellen. Diese und eine Reihe weiterer offener Fragen gilt es in künftigen Projekten zu klären, um deren positive Eigenschaften wie die Reduktion von Schadstoffen (insbesondere Partikel- und Stickoxidemissionen) und Treibhausgasemissionen optimal ausnutzen zu können und auf spezielle Anwendungsbereiche zu fokussieren.

APPENDIX



REACH-Registrierungen

Tabelle 2
Übersicht zu in der Datenbank
der ECHA bereits eingetragenen
synthetischen Kraftstoffen

| Kraftstofftyp | Bezeichnung laut ECHA-Datenbank | Registrierungsnummer (EC number) | Produktions- / Importmengen in t/a |
|---|---|--------------------------------------|------------------------------------|
| Ammoniak | Ammonia | 913-720-3 | nicht angegeben |
| | Ammonia, anhydros | 231-635-3 | ≥ 10.000.000 |
| Synthetisches Benzin (Methanol-to-Gasoline) | Gasoline | 289-220-8 | ≥ 100.000.000 bis < 1.000.000.000 |
| Synthetischer Diesel | C ₈ – C ₂₆ branched and linear hydrocarbons – Distillates | 481-740-5 | ≥ 10.000 |
| Dimethylcarbonat (DMC) | Dimethyl carbonate | 210-478-4 | ≥ 10.000 bis < 100.000 |
| Dimethylether (DME) | Dimethyl ether | 204-065-8 | ≥ 10.000 bis < 100.000 |
| Synthetische Paraffinische Kerosine (SAF) | Fischer-Tropsch-Synthetic Paraffinic Kerosene (FT-SPK) | | |
| | Kerosine (Fischer-Tropsch), full-range, C ₈₋₁₆ -branched and linear | 481-670-5 | ≥ 1.000.000 |
| | C ₈ – C ₁₆ branched and linear hydrocarbons (full range) – Kerosine | 619-567-6 | 10 bis 100 |
| | Hydrocarbons of plastic waste origin (kerosene type fraction) | 942-178-0 | nicht angegeben |
| | Hydroprocessed Esters and Fatty Acids Synthetic Paraffinic Kerosene (HEFA-SPK) | | |
| | Petroleum kerosene fraction, co-processed with renewable hydrocarbons of plant and/or animal origin | 941-379-0 | 100.000 bis 1.000.000 |
| | Renewable hydrocarbons (kerosene type fraction) | 931-082-4 | 10.000 bis 100.000 |
| | Alcohol to Jet Synthetic Paraffinic Kerosene (ATJ-SPK) | | |
| | Synthetic Paraffinic Kerosine derived from a feedstock of alcohol | 943-146-9 | nicht angegeben |
| | Methan | Methane | 200-812-7 |
| Methanol | Methanol | 200-659-6 | ≥ 10.000.000 bis < 100.000.000 |
| Methylformiat (MeFo) | Methyl formate | 203-481-7 | ≥ 100.000 bis < 1.000.000 |
| Oxymethylenether (OME) | 2,4,6-Trioxaheptane (= OME ₂) | 818-227-6 | nicht angegeben |
| | 2,4,6,8-Tetraoxanonane (= OME ₃) | 818-232-3 | nicht angegeben |
| | OME ₃₋₅ | REACH PRORD 04-2120108242-73-0000 | < 1 |

Kraftstoffnormen

Tabelle 3

Übersicht zu existierenden Normen, in denen synthetische Kraftstoffe inkl. zulässiger Beimischungsquoten erfasst sind

| Kraftstoff | in Norm | Titel | Beimischung innerhalb der Norm |
|---|----------------|--|--|
| Ammoniak | – | Keine Normungsaktivität für Ammoniak als Kraftstoff bekannt | – |
| Synthetisches Benzin (Methanol-to-Gasoline) | DIN EN 228 | Kraftstoffe – Unverbleite Ottokraftstoffe – Anforderungen und Prüfverfahren | bis zu 100 Vol.% ^a |
| Synthetischer Diesel | DIN EN 15940 | Kraftstoffe – Paraffinischer Dieseldieselkraftstoff aus Synthese oder Hydrierungsverfahren | 100 Vol.% (bis zu 7 Vol.% FAME) |
| | DIN EN 590 | Kraftstoffe– Dieseldieselkraftstoff – Anforderungen und Prüfverfahren | bis zu 26 Vol.% HVO ^b (bis zu 7 Vol.% FAME) |
| Dimethylcarbonat (DMC) | – | DIN EN 228 nicht anwendbar; Keine Normungsaktivität für DMC/MeFo als Kraftstoff bekannt | – |
| Dimethylether (DME) | DIN TS 51698 | Kraft- und Brennstoffe - Anforderungen - Dimethylether (DME) | 100 Vol.% |
| Synthetische Kerosine (SAF) | ASTM D7566 | Annex A1: Fischer-Tropsch Synthetic Paraffinic Kerosene (FT-SPK) | bis zu 50 Vol.% |
| | | Annex A2: Hydroprocessed Esters and Fatty Acids Synthetic Paraffinic Kerosene (HEFA-SPK) | bis zu 50 Vol.% |
| | | Annex A3: Hydroprocessed Fermented Sugars to Synthetic Isoparaffins (HFS-SIP) | bis zu 10 Vol.% |
| | | Annex A4: Fischer-Tropsch Synthetic Paraffinic Kerosene with Aromatics (FT-SPK/A) | bis zu 50 Vol.% |
| | | Annex A5: Alcohol-to-Jet Synthetic Paraffinic Kerosene (ATJ-SPK) | bis zu 50 Vol.% |
| | | Annex A6: Catalytic Hydrothermolysis Synthesized Kerosene (CH-SK, or CHJ) | bis zu 50 Vol.% |
| | | Annex A7: Hydroprocessed Hydrocarbons, Esters and Fatty Acids Synthetic Paraffinic Kerosene (HHC-SPK or HC-HEFA-SPK) | bis zu 10 Vol.% |
| Methan | DIN EN 16723-2 | Erdgas und Biomethan zur Verwendung im Transportwesen und Biomethan zur Einspeisung ins Erdgasnetz | bis zu 100 Vol.% |

^a in Abhängigkeit der erzielten Oktanzahl

^b ausschlaggebend für die Limitierung der Beimischung ist das Normkriterium der unteren Dichte

APPENDIX

| Kraftstoff | in Norm | Titel | Beimischung innerhalb der Norm |
|------------------------|----------------|---|--------------------------------|
| Methanol | DIN EN 228 | Kraftstoffe – Unverbleite Ottokraftstoffe – Anforderungen und Prüfverfahren | bis zu 3 Vol.% |
| | – | Normungsaktivität auf nationaler Ebene im Rahmen des Normarbeitskreises NAK 51697 »Methanol als Kraftstoff« zum 2.12.2022 durch DIN-FAM gestartet | – |
| Methylformiat (MeFo) | – | DIN EN 228 nicht anwendbar; Keine Normungsaktivität für DMC/MeFo als Kraftstoff bekannt | – |
| Oxymethylenether (OME) | E DIN TS 51699 | Kraft- und Brennstoffe – Anforderungen an Polyoxymethylen-dimethylether (OME) | 100 Vol.% |
| Wasserstoff | DIN EN 17124 | Wasserstoff als Kraftstoff – Produktfestlegung und Qualitätssicherung – Protonenaustauschmembran (PEM) – Brennstoffzellenanwendungen für Straßenfahrzeuge | 100 Vol.% |

Abkürzungsverzeichnis

| | |
|-------------------------|---|
| AEL | Alkalische Elektrolyse |
| ASTM | ASTM International, ursprünglich American Society for Testing and Materials |
| AtJ | Alcohol-to-Jet |
| atm | physikalische Atmosphäre, Einheit des Drucks (1atm = 1,01325 bar = 101,325kPa) |
| BEniVer | Begleitforschung (der BMWK-Förderinitiative) Energiewende im Verkehr |
| BHT | Butylhydroxytoluol (Antioxidans) |
| BImSchG | Bundes-Immissionsschutzgesetz |
| BImSchV | Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes |
| BtL | Biomass-to-Liquid |
| CAEP | Committee on Aviation Environmental Protection, Ausschuss für den Umweltschutz in der Luftfahrt |
| CEN | Comité Européen de Normalisation, Europäisches Komitee für Normung |
| CH₄ | Methan |
| CNG | Compressed Natural Gas, komprimiertes Erdgas |
| CO | Kohlenstoffmonoxid |
| CO₂ | Kohlenstoffdioxid |
| C_x | Kettenlängen von Kohlenwasserstoffen mit X Kohlenstoffatomen |
| DAC | Direct Air Capture, Gewinnung von CO ₂ direkt aus der Umgebungsluft |
| DIN | Deutsches Institut für Normung oder Deutsche Industrie-Norm |
| DMC | Dimethylcarbonat |
| DME | Dimethylether |
| ECHA | Europäische Chemikalienagentur |
| EG | Europäische Gemeinschaft |
| EN | Europäische Norm |
| EU | Europäische Union |
| FAME | Fatty Acid Methyl Ester, Fettsäuremethylester |
| FQD | Fuel Quality Directive, Kraftstoffqualitätsrichtlinie |
| FT | Fischer-Tropsch |
| Gew. % | Gewichtsprozent, Massenanteil in Prozent |
| GHS(-Einstufung) | Global harmonisiertes System (zur Einstufung und Kennzeichnung von Chemikalien) |
| GtL | Gas-to-Liquid |
| H₂ | Wasserstoff |
| H₂O | Wasser |
| HEFA | Hydroprocessed Esters and Fatty Acids |
| HVO | Hydrotreated Vegetable Oil, hydriertes Pflanzenöl |
| ICAO | International Civil Aviation Organization, Internationale Zivilluftfahrtorganisation |
| IMO | International Maritime Organization, Internationale Seeschiffahrts-Organisation |
| ISO | International Organization for Standardization, Internationale Organisation für Normung |
| l | Liter |

| | |
|-----------------------|---|
| LBM | Liquefied Biomethane, verflüssigtes Biomethan |
| Lkw | Lastkraftwagen |
| LNG | Liquefied Natural Gas, verflüssigtes Erdgas |
| MARPOL | International Convention for the Prevention of Marine Pollution from Ships, 1973 (kurz: Marine Pollution), Internationales Übereinkommen von 1973 zur Verhütung der Meeresverschmutzung durch Schiffe |
| MeFo | Methylformiat |
| Mio. | Millionen |
| MJ | Megajoule |
| MtG | Methanol-to-Gasoline |
| MtJ | Methanol-to-Jet |
| N₂ | Stickstoff |
| N₂O | Lachgas |
| NBR | Nitrile Butadiene Rubber, Nitril-Butadien-Kautschuk |
| NH₃ | Ammoniak |
| NO_x | Stickoxide |
| OME | Oxymethylenether |
| PEMEL | Protonenaustauschmembran-Elektrolyse |
| Pkw | Personenkraftwagen |
| PM | Partikelmasse |
| PN | Partikelanzahl |
| PPORD | Product and Process Orientated Research and Development, produkt- und verfahrensorientierte Forschung und Entwicklung |
| PtG | Power-to-Gas |
| PTL | Power-to-Liquid |
| PtX | Power-to-X |
| REACH | Registration, Evaluation, Authorisation and Restriction of Chemicals, Registrierung, Bewertung, Zulassung und Beschränkung von Chemikalien |
| RED | Renewable Energy Directive, Erneuerbare Energie Direktive |
| RFNBO | Renewable Fuels of Non-Biological Origin, erneuerbare Kraftstoffe nicht-biogenen Ursprungs |
| SAF | Sustainable Aviation Fuel, nachhaltiges Kerosin |
| SIP | Synthetic Isoparaffins, Synthetische Isoparaffine |
| SOEL | Solid Oxide Electrolysis, Festoxid-Elektrolyse |
| SO_x | Schwefeloxide |
| t | Tonnen |
| t/a | Tons per Annum, Tonnen pro Jahr bzw. Jahrestonnen |
| THG | Treibhausgas(e) |
| TS | Technical Specification, Technische Spezifikation (Vornorm) |
| Vol. % | Volumenprozent, Volumenanteil in Prozent |

IMPRESSUM

Herausgebende

Dr. Jens Artz

Dr. Philip Ruff

DECHEMA

Gesellschaft für Chemische Technik und Biotechnologie e.V.

Theodor-Heuss-Allee 25

60486 Frankfurt am Main

Verantwortlicher im Sinne des Presserechts

Dr. Jens Artz

Gestaltung und Satz

Lindner & Steffen GmbH,

www.lindner-steffen.de

Bildnachweis

AdobeStock: Gabriele Maltinti, adimas, yotrakbutda, phonlamaipphoto, Mike Mareen, Sonja, bannafarsai, millaf, alexlukin, lovelyday12, enanuchit, QuietWord (Umschlag), AdriFerrer, MVProductions, GenieStock, Jose Luis Stephens, WebcraftSV, assistant, Dodor_inna, artfully-79

Die Projektpartner danken dem Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) für die finanzielle Unterstützung des Vorhabens (FKZ 03EIV241).

Darüber hinaus gilt ein besonderer Dank der Mabanaft GmbH & Co.KG für die Finanzierung des Layouts dieser Veröffentlichung.

Betreut wurde das Projekt durch den Projektträger Jülich.

Erschienen im Juni 2023 in Frankfurt am Main

1. Auflage

ISBN 978-3-89746-244-1

KOORDINIERT VON



DECHEMA

Gesellschaft für Chemische Technik
und Biotechnologie e.V.

