

Forschungsinitiative Energiewende im Verkehr

Kurzbericht zur „Roadmap für strombasierte Kraftstoffe“

Mai 2023



BEniVer

Begleitforschung Energiewende im Verkehr



Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

BENIVER KURZBERICHT

Dieser Bericht ist Teil der Forschungsinitiative Energiewende im Verkehr (EiV). Er beinhaltet einen Auszug aus der „Roadmap für strombasierte Kraftstoffe“, einem Leitfaden mit Handlungsoptionen für die Erforschung, Entwicklung, Produktion und Markteinführung von strombasierten Kraftstoffen, der im Rahmen der Begleitforschung Energiewende im Verkehr (BEniVer) erstellt wurde. Die ausführliche Version der Roadmap, welche die Nachvollziehbarkeit und Transparenz der Ergebnisse sicherstellt, ist im Gesamtbericht enthalten.

Die Autorinnen und Autoren danken den beteiligten Forschungsinstituten, dem Fördermittelgeber und Projektträger sowie den zahlreichen Expertinnen und Experten aus den Forschungsprojekten der Energiewende im Verkehr für die konstruktive Zusammenarbeit und die wertvollen Beiträge zum vorliegenden Bericht.

Die diesem Bericht zugrunde liegende Begleitforschung zur Forschungsinitiative EiV wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) unter dem Förderkennzeichen 03EiV116A-G durchgeführt.

| | |
|------------------------|--|
| Projektlaufzeit | 1. Juni 2018 – 31. Mai 2023 |
| Verbundpartner | Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR) Institut für ZukunftsEnergie- und Stoffstromsysteme (IZES gGmbH) Forschungsstelle für Energiewirtschaft e.V. (FfE) Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung (UFZ) Deutsches Biomasseforschungszentrum (DBFZ gGmbH) Gesellschaft für Wirtschaftliche Strukturforschung (GWS mbH) |

IMPRESSUM

| | |
|---|--|
| Herausgeber | Verbundvorhaben BEniVer Begleitforschung Energiewende im Verkehr |
| Anschrift | Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR) Pfaffenwaldring 38-40 70569 Stuttgart E-Mail: beniver@dlr.de |
| Stand | 24. Mai 2023 |
| Layout/Satz | Hacker Media, Amselweg 10, 71384 Weinstadt www.hacker-media.de |
| Gefördert durch | Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz |
| Begleitforschung | betreut durch den Projektträger Jülich |
| Forschungsinitiative Energiewende im Verkehr | betreut durch den Projektträger Jülich und TÜV Rheinland Consulting |

AUTORINNEN UND AUTOREN



Prof. Dr. Manfred Aigner
Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. – Institut für Verbrennungstechnik

Manfred Aigner war 23 Jahre der Direktor des DLR-Instituts für Verbrennungstechnik mit den Forschungsschwerpunkten Gasturbinen, Verbrennung, Reduktion von Schadstoff-Emissionen und nachhaltige Kraftstoffe. Er hat die Projektleitung von BEniVer übernommen.



Dr. Danial Esmaeili Aliabadi
Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung GmbH UFZ

Danial Esmaeili ist Gruppenleiter der Arbeitsgruppe „Erneuerbare Energien“ am UFZ. Im Rahmen des Projekts BEniVer hat er die energetische Nutzung von biogenen Stoffen und erneuerbarem Strom zur Herstellung von Biokraftstoffen und synthetischen Kraftstoffen im deutschen Verkehrssektor unter Berücksichtigung der theoretischen, technischen und institutionellen Besonderheiten modelliert.



Dr. Andrea Amri-Henkel
Institut für Zukunftsenergie- und Stoffstromsysteme IZES gGmbH; Arbeitsfeld Energiemärkte

Andrea Amri-Henkel arbeitet als Nachhaltigkeitswissenschaftlerin im Themenbereich Energiewende. Im Projekt BEniVer befasste sie sich mit der Entwicklung von Markteinführungsmechanismen sowie mit den zu beachtenden Nachhaltigkeitsaspekten.

Dr.-Ing. John Anderson

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. – Institut für Verkehrsforschung

John Anderson forscht zu den Themen Elektromobilität, Ladeinfrastruktur und synthetische Kraftstoffe. Ein besonderer Fokus liegt auf der Nutzerakzeptanz. Im Projekt BEniVer lag der Schwerpunkt auf der Durchführung und Auswertung von qualitativen Fokusgruppendifkussionen zur Akzeptanz von erneuerbaren Kraftstoffen im Wirtschaftsverkehr.



Lisa Becker
Gesellschaft für Wirtschaftliche Strukturforchung mbH (GWS), Osnabrück

Lisa Becker arbeitet als Volkswirtin an makroökonomischen Modellierungen von Energiewendeszenarien auf nationaler Ebene. Im BEniVer-Projekt befasste sie sich mit den gesamtwirtschaftlichen Auswirkungen der Szenarien zur Energiewende im Verkehrsbereich.



Moritz Bergfeld
Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. – Institut für Verkehrsforschung

Moritz Bergfeld arbeitet schwerpunktmäßig in den Themenfeldern der Elektromobilität und Sektorenkopplung. Der Fokus liegt dabei auf dem Ladebedarf von Elektrofahrzeugen und deren Integration in das Energiesystem. Zudem betreut er das Ladebedarfsmodell CURRENT. Im Projekt BEniVer lag der Schwerpunkt auf der Durchführung und Auswertung von quantitativen Untersuchungen zur Akzeptanz von erneuerbaren Kraftstoffen im Personenverkehr.



Dr.-Ing. Urte Brand-Daniels
Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. – Institut für Vernetzte Energiesysteme, Abteilung Energiesystemanalyse

Urte Brand-Daniels leitet die Forschungsgruppe „Energieszenarien und Technologiebewertung“ am DLR-Institut für Vernetzte Energiesysteme. Sie unterstützte in BEniVer bei der ökologischen Bewertung von strombasierten Kraftstoffen.



Dr. rer. nat. Marina Braun-Unkhoff

ehemals: Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. – Institut für Verbrennungstechnik

Die Schwerpunkte der Arbeiten von Marina Braun-Unkhoff sind Untersuchungen zur Verbrennung und zum Schadstoffverhalten von gasförmigen und flüssigen Brenn-, Kraft- und Treibstoffen, mit einem besonderen Augenmerk auf alternative und nachhaltige Energieträger. Ihr Fokus im Projekt BEniVer lag auf der Nutzung und Anwendung der strombasierten Kraftstoffe in den verschiedenen Sektoren (bodengebundener Verkehr, Luft- und Schifffahrt, Rückverstromung).



Dr. Sabine Brinkop

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. – Institut für Physik der Atmosphäre, Abteilung Erdsystemmodellierung für Luftfahrt, Raumfahrt, Verkehr und Energie (ESM)

Sabine Brinkop arbeitet im Bereich der Erdsystemmodellierung und der Analyse von Klimaänderungsszenarien. Das Projekt BEniVer unterstützte sie mit einer Einschätzung möglicher Folgen der Kraftstoffpfade bezüglich Klima und Luftqualität.



Dr. André Brosowski

ehemals: DBFZ

André Brosowski beschäftigt sich mit der Verfügbarkeit und Nachhaltigkeit von biogenen Rohstoffen. In BEniVer bildeten seine Daten die Ausgangsbasis für die Bewertung unterschiedlicher Kraftstoffoptionen.



Özcan Deniz

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. – Institut für Fahrzeugkonzepte

Özcan Deniz befasst sich mit der Bewertung elektrischer Antriebssysteme und Energieträger in zukünftigen Nutzfahrzeugkonzepten. Dies beinhaltet die Marktsimulation von Nutzfahrzeugtechnologieszenerarien unter Anwendung und Weiterentwicklung der DLR-Software VECTOR21. Im BEniVer-Projekt hat er sich mit der Entwicklung der Szenarien für den LKW-Fahrzeugmarkt sowie der Integration der synthetischen Kraftstoffe ins Verkehrssystem beschäftigt.



Dr. Ralph-Uwe Dietrich
Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. – Institut für Technische Thermodynamik

Ralph-Uwe Dietrich leitet die Forschungsgruppe „Techno-ökonomische Analyse“ am DLR-Institut für Technische Thermodynamik. Er ist verantwortlich für die techno-ökonomische und ökologische Bewertung der Herstellungspfade alternativer Kraftstoffe für die Luftfahrt und den Transportsektor insgesamt. In BEniVer leitete er das Arbeitspaket „Kraftstoffherzeugung“.



Dr.-Ing. Christine Eisenmann
Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. – Institut für Verkehrsforschung

Christine Eisenmann befasst sich mit den Themen Pkw-Besitz und -Nutzung, Akzeptanz neuer Mobilitätskonzepte und Technologien mit Fokus auf Antriebe und Energieträger (z. B. Elektromobilität, synthetische Kraftstoffe) und Umweltwirkungen des Verkehrs. Im Projekt BEniVer lag der Schwerpunkt auf der inhaltlichen Begleitung der qualitativen und quantitativen Untersuchungen zur Akzeptanz von erneuerbaren Kraftstoffen.



Dr. David Ennen
Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. – Institut für Flughafenwesen und Luftverkehr

David Ennen ist Volkswirt und forscht schwerpunktmäßig zu den Beschäftigungs- und Einkommenseffekten des Verkehrs. Im Projekt BEniVer befasste er sich mit der ökonomischen Modellierung der Automobilindustrie bei einer zunehmenden Produktion von Fahrzeugen mit alternativen Antrieben.



Jonas Eschmann
Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. – Institut für Vernetzte Energiesysteme

Jonas Eschmann arbeitet in der Abteilung Energiesystemanalyse an den makroökonomischen Fragestellungen der Energiesystemtransformation. In BEniVer bildet das von ihm entwickelte Handelsflussmodell die Grundlage zur Erstellung der Außenhandelsszenarien für relevante Energietechnologien.



Benjamin Frieske
Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. – Institut für Fahrzeugkonzepte

Der Forschungsschwerpunkt von Benjamin Frieske ist die Innovations- und Wertschöpfungsanalyse im Automobilbereich. Zudem befasst er sich mit der Analyse von Veränderungen bei Wertschöpfungsprozessen, -strukturen und Lieferketten vor dem Hintergrund der Transformation in der Automobilindustrie. Im Projekt BEniVer befasste er sich mit dem Technologie-Monitoring bei synthetischen Kraftstoffen und dem Benchmarking der technologischen Position im internationalen Vergleich. Außerdem war er für die Erstellung der Außenhandelsszenarien im Automobilbereich verantwortlich.



Wolfgang Grimme
Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. – Institut für Flughafenwesen und Luftverkehr

Wolfgang Grimme arbeitet in den Bereichen ordnungspolitischer Maßnahmen im Luftverkehr, Verkehrsprognosen und Umweltökonomie. Im Projekt BEniVer lag der Schwerpunkt auf der Modellierung von Luftverkehrsnachfrage, Flugzeugflotten, Energieverbrauch und Emissionen.



Sofia Haas
Forschungsstelle für Energiewirtschaft e.V.

Sofia Haas beschäftigt sich mit den Themen Nachhaltigkeit, Klima- und Ressourcenschutz in der Energiewirtschaft. In BEniVer lag ihr Fokus auf der Bereitstellung von Rahmenannahmen und -daten und der ökobilanziellen Bewertung von synthetischen Kraftstoffpfaden.



Samuel Hasselwander
Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. – Institut für Fahrzeugkonzepte

Der Forschungsschwerpunkt von Samuel Hasselwander ist die quantitativ-wissenschaftliche Bewertung von Fahrzeugantriebstechnologien für zukünftige Personenkraftwagen. Dies umfasst sowohl hybridisierte und vollelektrifizierte Systeme als auch den Einsatz synthetischer Kraftstoffe. Darüber hinaus arbeitet er an zukünftigen Fahrzeugtechnologieszenerarien. Im Projekt BEniVer befasste er sich mit der Entwicklung der Szenarien für den Pkw-Fahrzeugmarkt, der Integration der synthetischen Kraftstoffe ins Verkehrssystem sowie den Kraftstoffbedarfen für Sonderfahrzeuge.



Eva Hauser
Institut für Zukunftsenergie- und Stoffstromsysteme IZES gGmbH

Eva Hauser ist die Forschungs koordinatorin der IZES gGmbH. Als Politikwissenschaftlerin erforscht sie vielfältige Fragestellungen rund um die Energiewende. Im Projekt BEniVer leitete sie die Untersuchungen im Arbeitspaket zur Entwicklung von Markteinführungsmechanismen für synthetische Kraftstoffe.



Sascha Heib

Institut für Zukunftsenegie- und Stoffstromsysteme IZES gGmbH; Arbeitsfeld Umweltpsychologie

Sascha Heib forscht als Psychologe zu sozial- und verhaltenswissenschaftlichen Fragen einer nachhaltigen Transformation des Energiesystems. Im Projekt BEniVer umfassten seine Tätigkeiten insbesondere die Durchführung von aktors- und sektorspezifischen Befragungen sowie Medienanalysen zur gesellschaftlichen Akzeptanz synthetischer Kraftstoffe in Deutschland.



Dr. Matthias Jordan

Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung GmbH UFZ

Matthias Jordan forscht in der Arbeitsgruppe „Erneuerbare Energien“ am UFZ zur zukünftigen Rolle von Biomasse/ Bioenergie im zukünftigen Energiesystem. Er führt Energiesystemanalysen durch und arbeitet eng verknüpft mit dem DBFZ zusammen. Im Projekt BEniVer hat er über Jahre hinweg seine federführenden Kollegen Markus Millinger und Danial Esmaeili bei der Modellierung und im Projektgeschäft unterstützt.



Nathanael Heimann

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. – Institut für Technische Thermodynamik

Nathanael Heimann beschäftigt sich mit der techno-ökonomischen Analyse der Herstellung von PtX-Produkten. Ergänzend zur Produktion an Land untersucht er die Herstellung in maritimer Umgebung. Im Projekt BEniVer arbeitete er an den Rahmenannahmen sowie der Erstellung techno-ökonomischer Analysen.



Stefan Kronshage

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. – Institut für Vernetzte Energiesysteme, Abteilung Energiesystemanalyse

Stefan Kronshage forscht in der Energiesystemanalyse am DLR zu Transformationspfaden für die Dekarbonisierung von Energiesystemen. In BEniVer trug er zum Erstellen konsistenter Energierahmenszenarien bei, mit dem europäischen Bilanzrahmen als Schwerpunkt.



Dr. Johannes Hendricks

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. – Institut für Physik der Atmosphäre, Abteilung Erdsystemmodellierung für Luftfahrt, Raumfahrt, Verkehr und Energie (ESM)

Der Forschungsschwerpunkt von Johannes Hendricks ist die numerische Modellierung der Wirkungen von Emissionen auf Klima und Luftqualität, mit besonderem Fokus auf die Effekte des Land-, Luft- und Seeverkehrs. Das Projekt BEniVer unterstützte er mit Einschätzungen möglicher Wirkungen alternativer Kraftstoffe auf Klima und Luftqualität.



Dr. Christian Lutz

Gesellschaft für Wirtschaftliche Strukturforchung mbH (GWS), Osnabrück

Christian Lutz leitet den Bereich Energie und Klima. Forschungsschwerpunkte sind nachhaltige Entwicklung, energiewirtschaftliche Fragen, langfristiger Strukturwandel, Arbeitsmarkt und internationaler Handel. In BEniVer hat er die gesamtwirtschaftlichen Effekte der Szenarien zur Energiewende im Verkehr analysiert.



Jan Hildebrand

Institut für Zukunftsenegie- und Stoffstromsysteme IZES gGmbH; Arbeitsfeld Umweltpsychologie

Jan Hildebrand leitet das Arbeitsfeld Umweltpsychologie bei der IZES gGmbH. Im Projekt BEniVer koordinierte er die Untersuchungen im Arbeitspaket zur gesellschaftlichen Akzeptanz.



Henrik Mantke

Institut für Zukunftsenegie- und Stoffstromsysteme IZES gGmbH; Arbeitsfeld Energiemärkte

Henrik Mantke forscht als Energiewissenschaftler zu verschiedenen Themenfeldern der Energiewende. Im Projekt BEniVer war er insbesondere mit der Bewertung und Entwicklung von Markteinführungsmechanismen für synthetische Kraftstoffe befasst.



Carsten Hoyer-Klick

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. – Institut für Vernetzte Energiesysteme, Abteilung Energiesystemanalyse

Carsten Hoyer-Klick forscht zu zukünftigen Energiesystemen mit den Schwerpunkten Einbindung fluktuierender erneuerbarer Energien in das Stromsystem und Defossilisierung des Energie- und Verkehrssystems. Er leitete in BEniVer das Arbeitspaket Energiesystemanalyse.



Dr. Patrick Matschoss

Institut für Zukunftsenegie- und Stoffstromsysteme IZES gGmbH; Arbeitsfeld Energiemärkte

Patrick Matschoss arbeitet als Volkswirt zu einer großen Bandbreite energieökonomischer und klimapolitischer Themen. Im Projekt BEniVer lag sein Schwerpunkt auf der Markteinführung strombasierter Kraftstoffe.



Dr. Mariano Mertens
Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. – Institut für Physik der Atmosphäre, Abteilung Erdsystemmodellierung für Luftfahrt, Raumfahrt, Verkehr und Energie (ESM)

Der Forschungsschwerpunkt von Mariano Mertens ist die numerische Modellierung von Einflüssen von Verkehrsemissionen auf die Luftqualität und das Klima. Das Projekt BEniVer unterstützte er mit Einschätzungen möglicher Effekte alternativer Treibstoffe auf die Luftqualität und das Klima.



Dr.-Ing. Anika Neitz-Regett
Forschungsstelle für Energiewirtschaft e. V.

Anika Neitz-Regett leitet den Bereich Ressourcen und Klimaschutz an der FfE. Im Projekt BEniVer lag ihr Fokus auf der ökobilanziellen Bewertung von synthetischen Kraftstoffpfaden.



Ines Österle
ehemals: Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. – Institut für Fahrzeugkonzepte

Der Forschungsschwerpunkt von Ines Österle ist die Weiterentwicklung und Anwendung von VECTOR21, eine vom DLR entwickelte Software für die Simulation von Szenarien des Pkw-Sektors mit Fokus auf den Hochlauf elektrischer Antriebe sowie E-Fuels. Im Projekt BEniVer befasste sie sich mit der Entwicklung der Szenarien für den Pkw-Fahrzeugmarkt sowie der Integration der synthetischen Kraftstoffe ins Verkehrssystem.



Matthias Oswald
ehemals: Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. – Institut für Vernetzte Energiesysteme, Abteilung Energiesystemanalyse

Matthias Oswald forschte am DLR an der LCA und multidimensionalen Bewertung von alternativen Fahrzeugkonzepten und Kraftstoffen. Im Projekt BEniVer trug er maßgeblich zur ökologischen Bewertung von strombasierten Kraftstoffen in der Betriebsphase bei.



Simon Pichlmaier
Forschungsstelle für Energiewirtschaft e. V.

Simon Pichlmaier leitet den Bereich Wasserstoff und synthetische Energieträger an der FfE. In BEniVer lag sein Schwerpunkt auf den Rahmenannahmen, methodischen Grundlagen und der Durchführung von Ökobilanzen.



Dr.-Ing. Juliane Prause
Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. – Institut für Verbrennungstechnik

Juliane Prause forsch am Institut für Verbrennungstechnik zum Einsatz neuer, synthetischer Kraft- und Brennstoffe in der Energieversorgung und im Verkehr. Sie hat das interdisziplinäre BEniVer-Projektteam übergeordnet koordiniert und war zentrale Ansprechpartnerin und Schnittstelle für die begleiteten EiV-Verbundvorhaben.



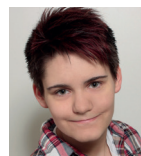
Dr. Thomas Pregger
Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. – Institut für Vernetzte Energiesysteme, Abteilung Energiesystemanalyse

Der Forschungsschwerpunkt von Thomas Pregger ist die Entwicklung und Bewertung von nationalen und internationalen Energieszenarien und Technologiepfaden. Das Projekt BEniVer unterstützte er bei der Erstellung konsistenter Energierahmenszenarien für die begleitende Energiesystemmodellierung.



Moritz Raab
Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. – Institut für Technische Thermodynamik

Moritz Raab befasst sich mit techno-ökonomischen Analysen zur Herstellung von Kraftstoffen und weiteren Chemikalien. Neben der eigentlichen Synthese sind seine Forschungsschwerpunkte auch bei der Bereitstellung der erneuerbaren Energie sowie der Logistik der Kraftstoffe. Im BEniVer-Projekt hat er die Erstellung der Rahmenannahmen geleitet sowie techno-ökonomische Analysen der Kraftstoffherstellungsprozesse durchgeführt.



Dr.-Ing. Sandra Richter
Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. – Institut für Verbrennungstechnik

Sandra Richter befasst sich mit den Eigenschaften alternativer Brenn-, Kraft- und Treibstoffe für unterschiedliche Anwendungsfelder. Der Schwerpunkt liegt auf den Verbrennungseigenschaften sowie der Schadstoffbildung. Ihr Fokus im Projekt BEniVer lag auf der Nutzung und Anwendung der strombasierten Kraftstoffe in den verschiedenen Sektoren (bodegebundener Verkehr, Luft- und Schifffahrt, Rückverstromung).

Eugenio Salvador Arellano Ruiz
Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. – Institut für Vernetzte Energiesysteme, Abteilung Energiesystemanalyse

Eugenio Arellano Ruiz forsch und entwickelt Methoden zur Umsetzung der FAIR Data-Prinzipien in der Energiesystemforschung. In BEniVer unterstützte er die Entwicklung von geeigneten Datenpipelines zur Datenintegration.



Niklas Wulff

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. – Institut für Vernetzte Energiesysteme, Abteilung Energiesystemanalyse

Niklas Wulff arbeitet in der Energiesystemmodellierung an Methoden zur Abbildung der Defossilisierung des deutschen Verkehrssektors. In BEniVer bearbeitete er die Weiterentwicklung des Energiesystemmodells REMix, seine Parametrierung und das Aufsetzen von Schnittstellen zu anderen Modellen.



Benjamin Zeck

Institut für Zukunftsenergie- und Stoffstromsysteme IZES gGmbH; Arbeitsfeld Energiemärkte

Benjamin Zeck forscht als Sozialwissenschaftler zu Akteuren und Technologien der Energiewende. Im Projekt BEniVer war er insbesondere mit der Bewertung und Entwicklung von Markteinführungsmechanismen für synthetische Kraftstoffe befasst.

BEITRAGENDE

Jens Artz

DECHEMA Gesellschaft für Chemische Technik und Biotechnologie e.V.

Deandra Drewke

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

Mario Feinauer

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. Institut für Fahrzeugkonzepte

Franziskus Hellwig

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

Amira Kellner

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

Karl Planke

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

Bernhard Malicek

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

Philip Ruff

DECHEMA Gesellschaft für Chemische Technik und Biotechnologie e.V.

INHALT

| | |
|--|-----------|
| 1. HERAUSFORDERUNGEN FÜR DIE ENERGIEWENDE IM VERKEHR | 9 |
| Forschungsinitiative Energiewende im Verkehr: Sektorkopplung durch die Nutzung strombasierter Kraftstoffe | 9 |
| Begleitforschung BEniVer | 10 |
| 2. KRAFTSTOFFBEDARFE..... | 12 |
| Methodik | 12 |
| Ergebnisse der Analysen | 12 |
| Einordnung und Diskussion der Ergebnisse | 14 |
| 3. KRAFTSTOFFBEREITSTELLUNG | 16 |
| 4. MARKTEINFÜHRUNG VON STROMBASIERTEN KRAFTSTOFFEN | 18 |
| 5. KRAFTSTOFFOPTIONEN IN DEN VERKEHRSBEREICHEN | 22 |
| 5.1 Rolle synthetischer Kraftstoffe in der Luftfahrt | 22 |
| Kraftstoffoptionen | 23 |
| Roadmap Luftfahrt..... | 25 |
| 5.2 Rolle synthetischer Kraftstoffe in der Schifffahrt | 27 |
| Kraftstoffoptionen | 27 |
| Roadmap Schifffahrt | 30 |
| 5.3 Rolle synthetischer Kraftstoffe im Straßenverkehr | 32 |
| Kraftstoffoptionen im Schwerlastverkehr | 33 |
| Kraftstoffoptionen im Pkw-Verkehr | 35 |
| Roadmap Straßenverkehr | 37 |
| 6. FAZIT UND AUSBLICK | 39 |
| ANHANG | |
| Abkürzungsverzeichnis..... | 40 |
| Quellen & Verweise..... | 41 |
| EiV Partner & assoziierte Partner | 45 |

1. HERAUSFORDERUNGEN FÜR DIE ENERGIEWENDE IM VERKEHR

Mit dem neuen Bundes-Klimaschutzgesetz vom 24. Juni 2021 wurde das Ziel der Klimaneutralität um fünf Jahre auf 2045 vorgezogen¹. Diese Zielerreichung stellt eine enorme Herausforderung dar, zu der alle Sektoren einen anspruchsvollen Beitrag leisten müssen.²

Im Stromsektor wurde im Jahr 2022 bereits ein Anteil von 48,3 % Strom aus erneuerbaren Energien erreicht.³ Die Verantwortung des Sektors geht jedoch weit über die „eigenen sektoralen Grenzen hinaus“. Dem Stromsektor „kommt durch die notwendige Elektrifizierung großer Teile weiterer Sektoren“, insbesondere auch dem Verkehrssektor, „eine Schlüsselrolle für deren Dekarbonisierung zu“⁴.

Im Verkehrssektor belief sich der Anteil an erneuerbaren Energiequellen einschließlich des Stromverbrauchs aus erneuerbaren Energien im Schienen- und Straßenverkehr in 2022 auf lediglich 6,8 %.⁵ Die Reduktion von CO₂ ist hier bislang hauptsächlich auf die Nutzung biogener Kraftstoffe in der Luft- und Schifffahrt und im Straßenverkehr zurückzuführen. Die durch Effizienzgewinne erzielten CO₂-Reduktionen wurden durch die Zunahme an Transportleistung nahezu nivelliert. So liegt der durchschnittliche Kraftstoffverbrauch seit vier Jahren gleichbleibend bei 7,4 Litern pro 100 Kilometer.⁶ Das verdeutlicht, dass die bisherigen Maßnahmen bei weitem nicht ausreichen, um die Klimaziele im Verkehr zu erreichen.

Synthetische Kraftstoffe sind Kraftstoffe, die nicht aus Erdöl gewonnen werden, sondern in chemisch-technischen oder biochemischen Prozessen hergestellt werden. Als Ausgangsmaterialien können Biomasse, CO₂ und Wasser dienen. Je nach Prozess handelt es sich um biobasierte (biogene) oder strombasierte Kraftstoffe, die wie fossile Kraftstoffe in Verbrennungsmotoren eingesetzt werden können.

Synthetische Kraftstoffe = biobasierte + strombasierte Kraftstoffe

Durch die Kopplung der Sektoren Energie und Verkehr soll die Energie für den Verkehrssektor durch erneuerbare Elektrizität bereitgestellt werden. Dabei gibt es hauptsächlich drei Optionen, den erneuerbaren Strom zu nutzen. Erstens durch eine direkte Elektrifizierung der Fahrzeuge.

Die Entwicklung der verfügbaren Technologieoptionen ist in eine Gesamtstrategie einzufügen, die auch weitere politische Klimaschutzmaßnahmen, wie beispielsweise Verkehrsvermeidung und -verlagerung sowie nachhaltige Effizienzsteigerungen beinhaltet.

Dies ist ökologisch und ökonomisch die effizienteste Technologie, welche jedoch derzeit noch bei Reichweite und Transportlast begrenzt ist. Als weitere Option wird erneuerbar hergestellter Strom mittels Elektrolyse zur Herstellung von grünem Wasserstoff genutzt, wodurch eine höhere Energiedichte erreicht wird. Die

höchste Energiedichte, und damit verbunden auch die höchste Reichweite und Transportlast, kann als dritte Option durch die weitere Umwandlung des Wasserstoffs in flüssige Energieträger, sogenannte strombasierte Kraftstoffe, erzielt werden.

FORSCHUNGSINITIATIVE ENERGIEWENDE IM VERKEHR: SEKTORKOPPLUNG DURCH DIE NUTZUNG STROMBASIERTER KRAFTSTOFFE

Zur Defossilisierung des Verkehrs (d.h. der Verzicht auf rohölbasierte/fossile Kraftstoffe) sollten alle drei o.g. Technologieoptionen entsprechend der spezifischen Anforderungen an den Transport in den jeweiligen Verkehrsbereichen in Betracht gezogen werden. Für die Entwicklung dieser drei Technologien gibt es zahlreiche Forschungsprogramme. Die Technologieoption „strombasierte Kraftstoffe“ wurde im Rahmen der Forschungsinitiative „Energiewende im Verkehr: Sektorkopplung durch die Nutzung strombasierter Kraftstoffe“ (EiV) gefördert, um das technologische Potenzial flüssiger Energieträger zu erforschen. Dazu hat das Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz zwischen 2018 und 2023 über 86 Mio. Euro Fördermittel bereitgestellt. Die 16 Projektverbünde mit über 100 beteiligten Partnern aus Industrie und Forschung fokussierten sich

dabei auf die Herstellung und/oder Nutzung innovativer, synthetischer Kraftstoffe in der Luft- und Schifffahrt sowie dem bodengebundenen Verkehr. Eng damit verbunden war auch der vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) geförderte Forschungsverbund NAMOSYN.

Die Erforschung dieser Kraftstoffe kann besonders vor dem Hintergrund aktueller weltpolitischer Entwicklungen Handlungsoptionen aufzeigen, um den bestehenden Herausforderungen zu begegnen. Die Substitution von rohöl-basierten Kraftstoffen durch synthetische Alternativen kann dabei helfen, die Abhängigkeit von Öl-Importen deutlich zu reduzieren sowie geopolitische Machtverhältnisse durch den Aufbau erneuerbarer Energieproduktion, neuer Wertschöpfungsketten und Energiepartnerschaften zu verändern und somit resiliente Versorgungsstrukturen aufzubauen. Durch ihre gute Speicherbarkeit und die Möglichkeit zu einer längeren Lagerung haben synthetische Kraftstoffe beispielsweise das Potenzial, im Fall von Notfallsituationen (z.B. Blackout), systemrelevante Funktionen aufrecht zu erhalten. Darüber hinaus bietet die Lager- und Transportfähigkeit der Kraftstoffe eine geeignete Voraussetzung für den Import.

| Verbund | Forschungsbereiche | Untersuchte Kraftstoffe | Fokussierte Verkehrsbereiche |
|--------------------------|--------------------|--|------------------------------|
| BEniVer | | Kraftstoffe der Forschungsinitiative | |
| C ³ -Mobility | | Synth. Benzin, DME, OME _{3,5r} , Methanol, Butanol, Oktanol | |
| CombiFuel | | Hythan | |
| E2Fuels | | Methanol, OME _{3,5r} , Methan, Hythan | |
| FlexDME | | Dimethylether (DME) | |
| ISystem4EFuel | | Synth. Diesel, Oxymethylenether (OME _{3,5}) | |
| KEROSyn100 | | Synth. Kerosin | |
| LeanStoich ₂ | | Hythan | |
| MEEMO | | Methanol | |
| MENA-Fuels | | Kraftstoffe der Forschungsinitiative | |
| MethQuest | | Methan, Methanol, Wasserstoff | |
| PlasmaFuel | | Synth. Diesel | |
| PowerFuel | | Synth. Kerosin | |
| SHARC | | Smartes Hafen-Applikationskonzept | |
| SolareKraftstoffe | | Synth. Benzin | |
| SynLink | | Synth. Diesel, synth. Kerosin, Methanol, höhere Alkohole | |
| NAMOSYN | | OME _{3,5r} , Dimethylcarbonat (DMC), Methylformiat (MeFo) | |

Abbildung 1: Forschungsbereiche und fokussierte Verkehrsbereiche der EiV-Verbundvorhaben

BEGLEITFORSCHUNG BENIVER

In den Projekten der Forschungsinitiative wurde eine Vielzahl verschiedener Kraftstoffe, Herstellverfahren und Anwendungen betrachtet. Dabei hat die „Begleitforschung Energiewende im Verkehr“ (BEniVer), als einer der 16 EiV-Projektverbünde, eine strategische Bedeutung durch ihre Aufgabe, die Projektergebnisse der technischen Forschungsvorhaben der Förderinitiative auf Basis eigenständiger wissenschaftlicher Analysen vergleichbar zu machen. Dazu hat die Begleitforschung in enger Zusammenarbeit mit den Verbundvorhaben einheitliche Rahmenannahmen und Methodikleitfäden⁷ im Rahmen von drei Statuskonferenzen und zahlreichen fachspezifischen Workshops entwickelt.

Die Ergebnisse der Forschungsprojekte wurden in einer Gesamtbetrachtung zusammengeführt und dienten als Grundlage für technische, ökonomische und ökologische Bewertungen. Dabei beruhen die technologie-orientierten Bottom-Up-Analysen auf den neuesten Forschungsarbeiten. Diese wurden mit systemorientierten Top-Down-Analysen des Energie- und Verkehrssystems sowie möglichen Transformationspfaden auf dem Weg zur Klimaneutralität kombiniert. In diesem Ansatz liegt eine Besonderheit von BEniVer. Weitere Analysen zur Akzeptanz und zur Markteinführung adressieren zudem gesellschaftliche Dimensionen und Auswirkungen der Einführung von strombasierten Kraftstoffen.

Die BEniVer-Roadmap für strombasierte Kraftstoffe basiert auf den Forschungsergebnissen der 15 durch BEniVer begleiteten Verbundvorhaben der EiV-Forschungsinitiative. Es werden Handlungsoptionen für die Markteinführung und den Produktionshochlauf strombasierter Kraftstoffe aufgezeigt. Maßnahmen für die Entwicklung alternativer Antriebstechnologien waren nicht Gegenstand der Begleitforschung.

Auf Basis der ganzheitlichen Analysen wurden Schlussfolgerungen abgeleitet, die auf verschiedenen Methodiken beruhen, teilweise aufeinander aufbauen und somit zu robusten Erkenntnissen führen. Als Ergebnis der langjährigen und fachübergreifenden Begleitung der EiV-Forschungsvorhaben entstand mit der „BEniVer Roadmap für strombasierte Kraftstoffe“ ein Leitfaden mit Handlungsoptionen für die Erforschung, Entwicklung, Produktion und Markteinführung dieser Kraftstoffe.

Die ausführlichen Daten und Analysen zu den Forschungsergebnissen sind dem Gesamtbericht der Roadmap zu entnehmen.

Der vorliegende Bericht stellt eine Kurzfassung der Roadmap dar. Anhand von Technologie-Szenarien wird zunächst der im Projekt modellierte Mengenbedarf an strombasierten Kraftstoffen dargestellt, der erforderlich wäre, um Klimaneutralität im Jahr 2045 mit den derzeit geltenden politischen und wirtschaftlichen Rahmenbedingungen zu erreichen (Kapitel 2). Anschließend erfolgt eine Analyse, wie und unter welchen Voraussetzungen die erforderlichen Mengen produziert und bereitgestellt werden könnten (Kapitel 3). In Kapitel 4 werden die Ergebnisse der Analysen kritisch beleuchtet. Auf Basis der daraus abgeleiteten Erkenntnisse werden Handlungsoptionen für den Produktionshochlauf und die Markteinführung präsentiert. In Kapitel 5 folgt schließlich eine Einordnung der Rolle strombasierter Kraftstoffe in den jeweiligen Verkehrsbereichen sowie die Bewertung der von den begleiteten Projektvorhaben erforschten Kraftstoffoptionen. Darauf aufbauend werden Kraftstoff-Roadmaps für die jeweiligen Verkehrsbereiche aufgezeigt.

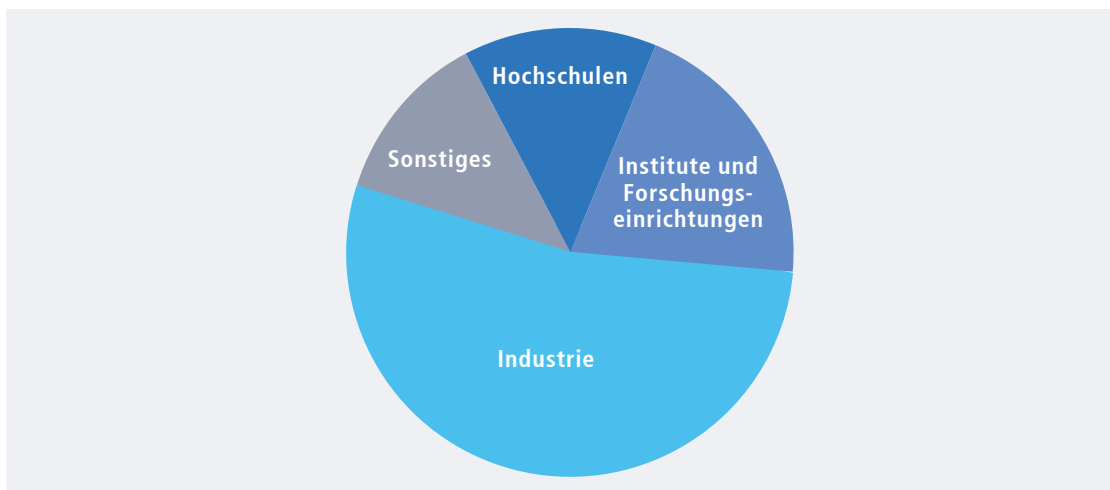


Abbildung 2: Über 100 Partner aus Industrie, Hochschulen und Forschungseinrichtungen waren in der Forschungsinitiative Energiewende im Verkehr beteiligt. Siehe Anhang für eine detaillierte Auflistung aller Partner.

2. KRAFTSTOFFBEDARFE

METHODIK

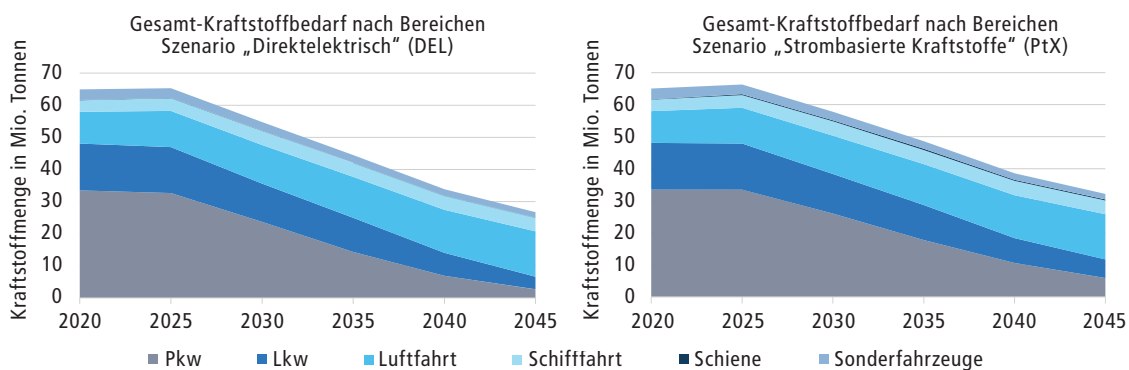
Im Projekt BEniVer wurden – beginnend zum Projektstart im Jahr 2018 – verschiedene Szenarien modelliert, um den Bedarf an strombasierten Kraftstoffen zu quantifizieren, der benötigt wird, um **unter den dann geltenden politischen Rahmenbedingungen Klimaneutralität im Verkehrssektor bis zum Jahr 2045** zu erreichen. Insbesondere sollen auch die Herausforderungen aufgezeigt werden, welche durch den Einsatz von synthetischen Kraftstoffen entstehen, wenn Verkehrsleistungen weiter steigen und viele Verbrennerfahrzeuge im Straßenverkehr im Bestand bleiben. Dabei greifen die Szenarien die wesentlichen Technologieoptionen für die Defossilisierung des Verkehrssektors auf: „Elektrifizierung (DEL)“, „Wasserstoff (H₂)“ und „Strombasierte Kraftstoffe (PtX)“. In den drei unterschiedlichen Szenarien werden diese Optionen unterschiedlich stark eingesetzt.

Die **Szenarien-Analysen stellen keine Prognosen oder Empfehlungen dar**. Sie beschreiben mögliche Wege (Transformationspfade) im Kontext der zugrundeliegenden Annahmen und sollen vor allem die Herausforderungen aufzeigen, welche durch den Einsatz von synthetischen Kraftstoffen entstehen. Am Projektanfang wurde beschlossen, sich auf die Antriebsstränge zu fokussieren und Verkehrsverlagerung und -vermeidung nicht in die Hauptmodellierungsstränge aufzunehmen, um die maximalen Herausforderungen bei weiter hohen Verkehrsleistungen analysieren zu können. Seit dem Projektbeginn im Jahr 2018 haben sich die (welt-)politischen Rahmenbedingungen in vielfacher Hinsicht stark verändert. Jedoch konnten nicht alle Gesetzesänderungen (insbesondere die Einhaltung der Sektor-Ziele 2030 gemäß dem Klimaschutzgesetz vom 12.12.2019) vollständig in der Modellierung berücksichtigt werden.

Annahmen für die Klimaschutz-Szenarien:

- ✓ Klimaneutralität im Verkehrssystem bis 2045 (THG100)
- ✓ bestehende politische Rahmenbedingungen
- ✓ moderate Zunahme der Verkehrsnachfrage
- ✓ deutliche Effizienzverbesserung der Technologien in Luft-, Schifffahrt und im bodengebundenen Verkehr
- ✓ nur noch emissionsfreie Pkw-Neuwagen ab 2035:
 - In DEL- und H₂-Szenarien hauptsächlich batterieelektrisch
 - Im PtX-Szenario bis zu 10 % nachweislich mit strombasierten Kraftstoffen betriebene Neuwagen möglich

ERGEBNISSE DER ANALYSEN

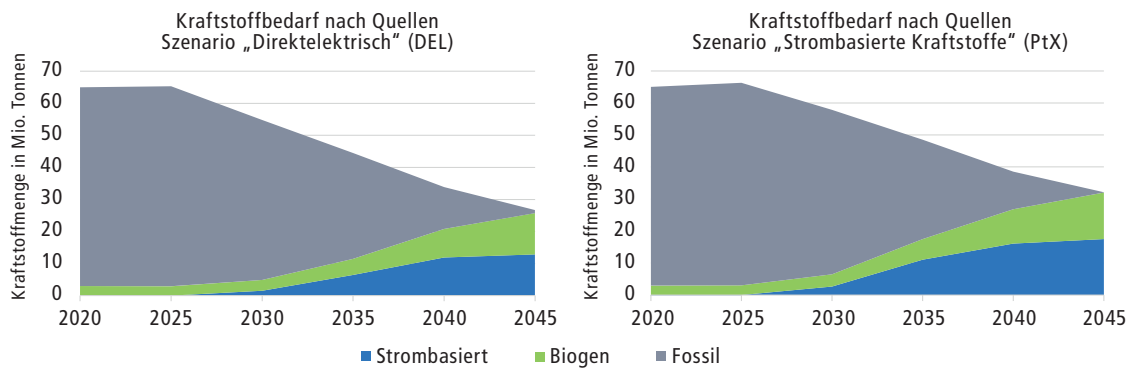


Abbildungen 3 und 4: Modellergebnisse bzgl. der Kraftstoffnachfrage nach Verkehrsträgern im Szenario „Direktelektrisch“ (DEL) und im Szenario „Strombasierte Kraftstoffe“ (PtX)

In den Abbildungen 3 und 4 ist der modellierte Gesamtbedarf an Treib- und Kraftstoffen (fossil, bio- und strombasiert) unter den getroffenen Annahmen dargestellt⁸. In allen untersuchten Szenarien nimmt der Gesamtbedarf ab, was auf die fortschreitende Elektrifizierung im Straßenverkehr zurückzuführen ist. Dadurch zeigt sich zudem eine Verschiebung des Hauptanteils der

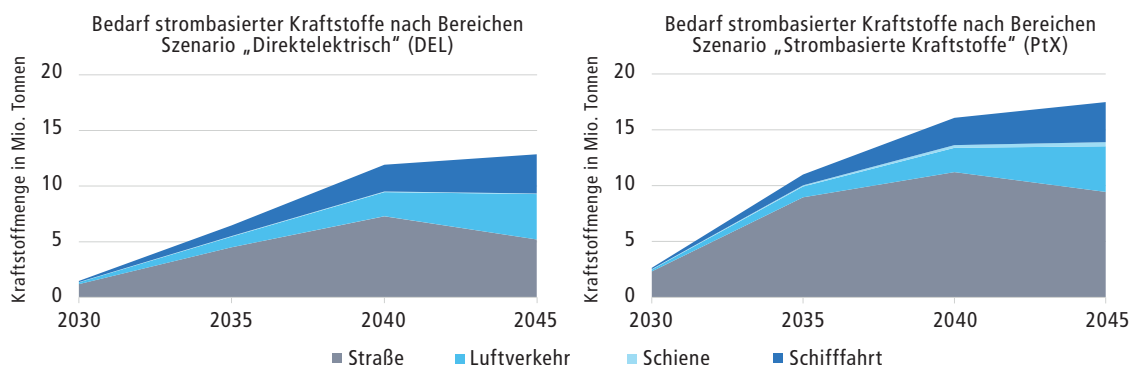
benötigen Kraftstoffmengen vom Straßenverkehr zur Luftfahrt. Dennoch bleibt in den BEniVer-Szenarien unter Annahme gleichbleibender politischer Rahmenbedingungen ein abnehmender Restbestand an Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor bis 2045 und darüber hinaus.

Der Bedarf in Luft- und Schifffahrt sowie bestimmten Nischenanwendungen (z.B. Landwirtschaft) bleibt unter den getroffenen Annahmen nahezu konstant. Der überwiegende Anteil kann in diesen Verkehrsbereichen aus heutiger technischer Sicht bis 2045 nur durch erneuerbare strom- und biobasierte Kraftstoffe defossilisiert werden. Mögliche Treib- und Kraftstoff-Ersparnisse durch Effizienzgewinne gleichen sich durch die hier angenommene zunehmende Verkehrsnachfrage nahezu aus.



Abbildungen 5 und 6: Kraftstoffmengen nach Quellen (fossil, biogen und strombasiert) im Szenario „Direktelektrisch“ (DEL) und im Szenario „Strombasierte Kraftstoffe“ (PtX) und über alle Verkehrsbereiche (Straßenverkehr, Schiene, Luft- und Schifffahrt)

In Abbildung 5 und 6 wird der Kraftstoff-Gesamtbedarf aus Abbildung 3 und 4 unterteilt nach den Kraftstoffquellen (fossil, bio- und strombasiert) dargestellt. Die 2020 im Verkehr genutzten Kraftstoffe waren noch zu 96 % fossilen Ursprungs. Um Klimaneutralität 2045 zu erreichen, wird in den BEniVer-Szenarien der verbleibende Kraftstoffbedarf bis 2045 vollständig durch synthetische Kraftstoffe ersetzt. Je nach Szenario ergibt sich ein **Kraftstoffbedarf in 2045 zwischen 25 bis 32 Mio. Tonnen synthetischem Kraftstoff (biogen und strombasiert) pro Jahr⁹**. Der **Bedarf an strombasierten Kraftstoffen** (blaue Fläche) wird in den drei in BEniVer untersuchten Szenarien auf **12,9 - 17,5 Mio. Tonnen über alle Bereiche** (Straßenverkehr, Schienenverkehr, Luft- und Schifffahrt) geschätzt.



Abbildungen 7 und 8: Nachfrage nach strombasierten Kraftstoffen in den Verkehrsbereichen (Straßenverkehr, Luftfahrt, Schiene und Schifffahrt) im Szenario „Direktelektrisch“ (DEL) und im Szenario „Strombasierte Kraftstoffe“ (PtX) ab 2030.

In den Abbildungen 7 und 8 wird der modellierte Bedarf an strombasierten Kraftstoffen (blauer Bereich in Abbildungen 5 und 6) in die Verkehrsbereiche unterteilt. Es zeigt sich eine Verschiebung des Hauptanteils der benötigten Kraftstoffmengen vom Straßenverkehr zur Luftfahrt, da durch die fortschreitende Elektrifizierung Fahrzeuge mit Verbrennungsmotoren nach und nach aus dem Straßenverkehr verschwinden. Die gezeigten Mengenverhältnisse basieren im Wesentlichen auf der Annahme eines linearen Anstiegs der Beimischungsquoten.

EINORDNUNG UND DISKUSSION DER ERGEBNISSE

Die Modellierungen zeigen, dass sich das Erreichen der Klimaziele im Verkehrssektor bis 2045 unter den bestehenden politischen und wirtschaftlichen Bedingungen äußerst herausfordernd gestaltet. Unter diesen Annahmen können die Klimaziele für 2045 gerade noch eingehalten werden, wenn eine äußerst ambitionierte Entwicklung aller verfügbaren Technologieoptionen (Elektrifizierung, Brennstoffzellen und synthetische Kraftstoffe) in allen Verkehrsbereichen erfolgt.

Im überwiegenden Anteil des Luft- und Schiffsverkehrs, insbesondere auf den energieintensiven langen Distanzen, ist der Einsatz synthetischer Kraftstoffe auf absehbare Zeit die einzige Option zur Defossilisierung. Der notwendige Hochlauf der Kraftstoff-Produktion muss jedoch zeitnah vorbereitet werden. In den Szenarien ist insbesondere um das Jahr 2030 ein sehr ambitionierter Ausbau der Bereitstellung von strombasierten Kraftstoffen auf 2 bis 3 Mio. Tonnen pro Jahr notwendig. Um ein gleichmäßigeres Produktionsverhältnis der Herstellungsanlagen zu erreichen, wäre es sinnvoll, die **Beimischungsquoten gezielt anzupassen und schon frühzeitig vorrangig Kerosin für den Luftverkehr und Schiffskraftstoffe herzustellen**, die auch nach 2045 sicher gebraucht werden.

Die aus ökonomischer und ökologischer Sicht günstigste Technologie, die direkte Elektrifizierung, lässt sich im Straßenverkehr am einfachsten einsetzen. Um das Ziel von 15 Mio. Elektroautos bis 2030 zu erreichen, müsste daher der Zuwachs an E-Autos auf dem Niveau von 2022 verbleiben, was eine starke Unterstützung durch die Politik voraussetzt. Basierend auf der modellierten Kaufentscheidung wird selbst im optimistischsten DEL-Szenario in BEniVer trotz eines hohen Marktanteils von 50 % im Jahr 2025 und über 66 % im Jahr 2030, nur ein Bestand von 11 Mio. batterieelektrischen Fahrzeugen (BEV) bis 2030 erreicht und somit das politische Ziel von 15 Mio. BEVs erst 2032 erreicht. Ohne weitere klimapolitische Maßnahmen würden bei gleichbleibender Fahrleistung somit Drop-In-Kraftstoffe für Bestandsfahrzeuge mit verbrennungsmotorischem Antrieb benötigt, um Klimaneutralität im Jahr 2045 zu erreichen. Zu vergleichbaren Ergebnissen kommen unter anderen auch Studien der Agora Energiewende¹⁰, der Boston Consulting Group¹¹, sowie des Ariadne-Konsortiums¹².

Der Einsatz strombasierter Kraftstoffe im Straßenverkehr ist jedoch umstritten. Wietschel et al.¹³ stellen beispielsweise detailliert dar, weshalb strombasierte Kraftstoffe aus ihrer Sicht nicht im Straßenverkehr eingesetzt werden sollten. Gegen den Einsatz im Straßenverkehr spricht der wesentlich höhere Bedarf an erneuerbarem Strom im Vergleich zur direkten Elektrifizierung, das geringere Treibhausreduktionspotenzial (solange der Strommix – auch zur Herstellung der EE-Anlagen – noch nicht 100 % erneuerbar ist), die höheren Kosten pro gefahrenem Kilometer sowie die Herausforderungen bei der Realisierbarkeit eines ausreichenden Mengenhochlaufs.

Um auf strombasierte Kraftstoffe im Straßenverkehr auch für den Bestand verzichten zu können, sind jedoch noch wesentlich ambitioniertere Maßnahmen erforderlich. In den Langfristszenarien¹⁴ kann zwar in zwei betrachteten Szenarien Klimaneutralität 2045 mit sehr geringen Mengen strombasierter Kraftstoffe erreicht werden, dafür sind in den Annahmen jedoch signifikante Anpassungen der politischen Rahmenbedingungen (CO₂-Abgabe, Anhebung Energiesteuer Diesel, Infrastrukturmaßnahmen Schiene und ÖPNV) erforderlich. Darüber hinaus wird eine Reduktion

des Verkehrsaufkommens (Stagnation des Personenverkehrs ab 2030) und eine Verlagerung von Pkw zu ÖPNV und Rad vorausgesetzt. Zudem muss der Hochlauf der Elektromobilität bis 2030 noch deutlich ambitionierter erfolgen. In den beiden Langfristszenarien wird von 21 Mio. Elektrofahrzeugen in 2030 ausgegangen, im Vergleich zu 11 Mio. im BEniVer DEL-Szenario.

Unter den im Projekt BEniVer getroffenen Annahmen wird ein Bedarf an strombasierten Kraftstoffen zwischen 12,9 - 17,5 Mio. Tonnen über alle Bereiche (Straßenverkehr, Schienenverkehr, Luft- und Schifffahrt) geschätzt. Würde es im Straßenverkehr gelingen, die Elektromobilität in den nächsten sieben Jahren deutlich über die gesetzten Ziele hinaus hochzufahren, die Verkehrsnachfrage zu reduzieren sowie Verkehr dort wo möglich auf Schiene und ÖPNV zu verlagern, so könnten die Klimaziele möglicherweise auch ohne den Einsatz der ökologisch und ökonomisch teureren, strombasierten Kraftstoffe erreicht werden. In diesem Fall würde in unseren Szenarien immer noch ein ambitionierter Bedarf von 7,7 – 8,1 Mio. Tonnen strombasierter Kraftstoffe für den Luft- und Schiffsverkehr sowie für weitere Nischenanwendungen, wie z.B. landwirtschaftliche Nutzfahrzeuge verbleiben.

3. KRAFTSTOFFBEREITSTELLUNG

Im Folgenden werden Optionen aufgezeigt, wie der in Kapitel 2 aufgezeigte Bedarf an strombasierten Kraftstoffen rechtzeitig bereitgestellt werden kann und welche Maßnahmen dafür erforderlich sind. Dazu werden die Bedarfe verglichen mit aktuellen politischen Zielen und Expertenmeinungen für den Mengenhochlauf sowie laufenden bzw. geplanten Demonstrationsprojekten.

Bislang gibt es nur sehr wenige verbindliche politische Zielvorgaben für den Hochlauf strombasierter Kraftstoffe. Im Luftverkehr soll in Deutschland der Anteil an strombasiertem Kerosin bis 2026 mindestens 0,5 % und bis 2030 2 % (0,2 Mio. Tonnen pro Jahr) betragen¹⁵. Darüber hinaus wird im Rahmen des Fit-for-55-Pakets¹⁶ der Europäischen Kommission eine Beimischungsquote von strombasierten Treibstoffen von zunächst 0,7 % für das Jahr 2030 vorgeschlagen, die bis 2045 auf 11 % steigen soll. Überträgt man diese Quoten auf den deutschen Bedarf (2018) so entsprechen dies 0,08 Mio. Tonnen in 2030 und 1,2 Mio. Tonnen strombasiertem Kerosin pro Jahr in 2045.

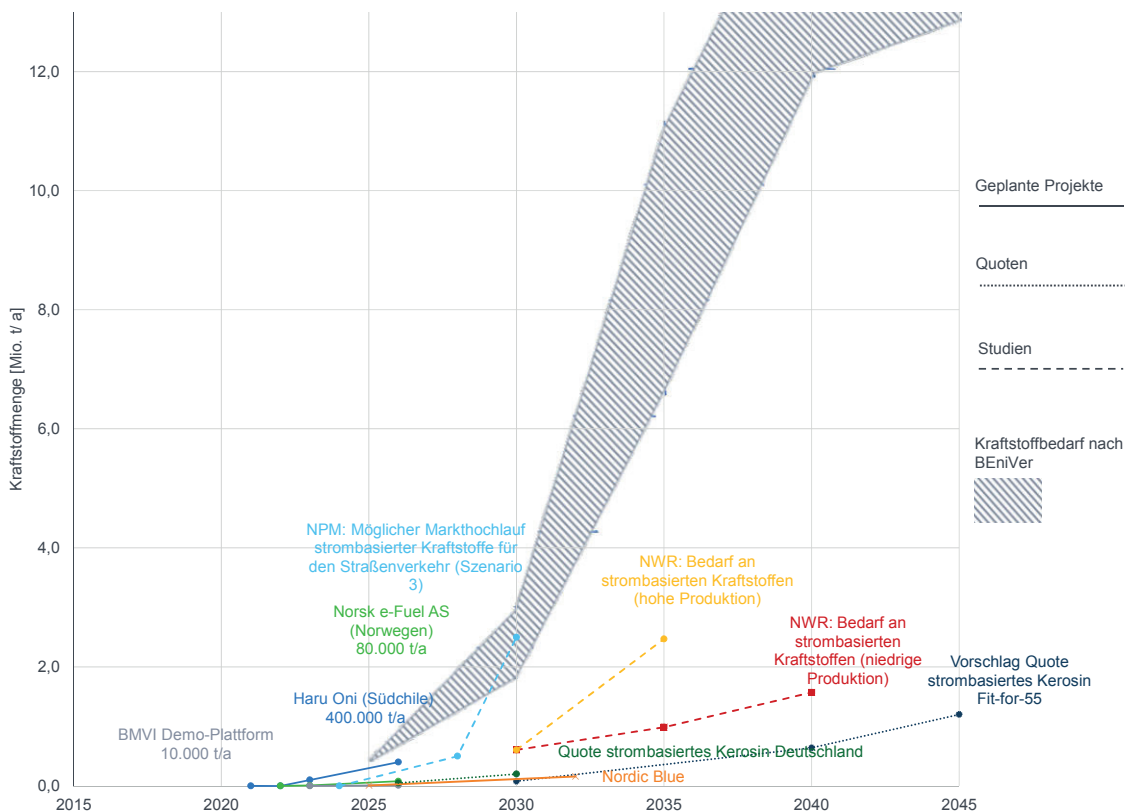


Abbildung 9: Bedarf an strombasierten Kraftstoffen und angekündigte Produktionskapazität in ausgewählten Projekten^{17, 18, 19, 20, 21, 22, 23}

Es zeigt sich, dass die politisch anvisierten Zielvorgaben der nationalen Quoten für den Luftverkehr sowie die im Rahmen des Fit-for-55-Pakets der Europäischen Kommission vorgeschlagenen Quoten im Luft- und Schiffsverkehr **bislang nicht ausreichen**, um bis 2045 die zur Erreichung der Treibhausgas-Minderungsziele erforderlichen Mengen strombasierter Kraftstoffe bereitzustellen. Auch im Vergleich zu den Bedarfs-Szenarien der unabhängigen Expertengremien „Nationale Plattform Zukunft der Mobilität“ (NPM) und dem „Nationalen Wasserstoffrat“ (NWR) zeigt sich, dass für 2030 und 2045 deutliche höhere strombasierte Kraftstoffmengen bereitgestellt werden sollten, als durch die Quoten abgedeckt werden könnten.

Die Technologien zur Herstellung der Kraftstoffe sind generell vorhanden, allerdings muss die großtechnische, industrielle Umsetzung zeitnah erfolgen. Bislang ist die Produktion von strombasierten Kraftstoffen auf sehr kleine Anlagen beschränkt. In Deutschland sind derzeit weitere Anlagen mit Kapazitäten von bis zu 10 Kilotonnen pro Jahr (kt/a) in der Planung. Weltweit sind mehrere großtechnische Anlagen von Produktionskapazitäten zwischen 80 kt/a (Norsk e-Fuel in Norwegen, 2029) und 440 kt/a (Haru Oni in Chile, 2027) geplant. Diese Kapazitäten werden jedoch nicht gleich zu Beginn, sondern erst in zwei bis drei Ausbaustufen erreicht, welche der Technologieerprobung dienen. Für die zwei größten in Europa angesiedelten Projekte (Norsk e-Fuel und Nordic Blue) ist nach der Realisierung der zweiten Ausbaustufe (zwischen 2029 und 2032) zunächst kein weiteres Scale-up beabsichtigt, sondern der Bau von weiteren Anlagen in der Größe von 80 kt/a (Norsk e-Fuel) bzw. 160 kt/a (Nordic Blue). Als wichtiger Einflussfaktor der maximalen Anlagengrößen gilt auch die Leistung der typischerweise installierten Windparks.

Die Deckung des in den BEniVer-Szenarien abgeschätzten Bedarfs von bis zu 2,6 Mio. Tonnen in 2030 entspräche einer benötigten Größenordnung von ca. 20 großen Produktionsanlagen im Maßstab von ca. 100 Kilotonnen strombasierter Kraftstoffe (vgl. Norsk e-Fuel). Dies kann aus technischer Sicht als durchaus realistisch eingeschätzt werden, wenn ein schneller Markthochlauf zeitnah angestoßen wird.

Der **ökologische Fußabdruck** bei der Produktion synthetischer Kraftstoffe wird **maßgeblich von der Treibhausgas-Bilanz der Strombereitstellung** für die Elektrolyse beeinflusst. Für die Bereitstellung der erforderlichen erneuerbaren Energie ist ein **massiver Ausbau der Kapazitäten erforderlich**. Gemäß der BEniVer Szenarien-Rechnungen muss dabei in einem klimaneutralen Stromsystem mehr als doppelt so viel erneuerbarer Strom bereitgestellt werden, als derzeit im deutschen Stromnetz insgesamt zur Verfügung steht.

Da es für die inländische Herstellung voraussichtlich nicht genügend erneuerbare Potenziale gibt, **wird Deutschland für den Bedarf an strombasierten, flüssigen Kraftstoffen zu großen Teilen auf den Import angewiesen sein.** In den BEniVer-Szenarien ergibt sich ein Importanteil von 74 - 90 %. Dies eröffnet auch neue Chancen, sich von den wenigen bisherigen Energielieferanten unabhängiger zu machen und neue Energie-Importländer zu erschließen. Hierzu müssen frühzeitig konkrete internationale Kooperationen aufgebaut werden.²⁴ So pflegt Deutschland bereits seit einigen Jahren Wasserstoff-Partnerschaften mit sonnen- und windreichen Ländern wie Namibia oder Australien.²⁵ Basis aller Kooperationen sollte dabei eine Zusammenarbeit auf Augenhöhe sein, welche die Bedürfnisse der lokalen Zivilbevölkerung berücksichtigt.

Die Modell-Ergebnisse legen nahe, dass sich Europa aufgrund großer Photovoltaik (PV)- und Offshore-Wind-Potenziale grundsätzlich selbstständig mit synthetischen Kraftstoffen versorgen könnte. Darüber hinaus besitzen auch nahezu alle MENA-Länder (Middle East, North Africa) ein großes technisches Potenzial an erneuerbaren Energien, welches eine kostengünstige Produktion von Wasserstoff und synthetischen Folgeprodukten ermöglicht. Bei globaler Öffnung und Verfügbarkeit könnten zudem auch Länder in Amerika und Ozeanien als Handelspartner für die EU eine zunehmend wichtige Rolle spielen.

4. MARKTEINFÜHRUNG VON STROMBASIERTEN KRAFTSTOFFEN

Aufgrund hoher Kosten und infrastruktureller sowie planerischer Herausforderungen bedarf es bei der Markteinführung von strombasierten Kraftstoffe einer Flankierung durch politisch initiierte Markteinführungsmechanismen (MEM). Dabei ist das jeweilige Entwicklungsstadium, in dem sich die Technologien aktuell befinden, zu beachten.

MEM sollen effektiv zur Erreichung der Klimaschutzziele sowie der 17 Ziele der Nachhaltigen Entwicklung der Vereinten Nationen (UN Sustainable Development Goals oder SDGs), die die Weltgemeinschaft bis zum Jahr 2030 umsetzen will²⁶, beitragen. Darüber hinaus sollten sie das Kriterium der „Robustheit“ erfüllen, die als Unempfindlichkeit gegenüber Abweichungen von den Annahmen oder von einzelnen außergewöhnlichen Ereignissen definiert²⁷ werden kann.

Da sich die **Markteinführung** strombasierter Kraftstoffe zum heutigen Zeitpunkt in einer sehr frühen Phase befindet, sollte sie als „lernendes System“ gestaltet werden, sich **in eine übergeordnete Defossilisierungsstrategie der Energiewende einfügen** und MEM den Fokus auf die weitere Technologieentwicklung legen. Dabei können die Kriterien der Effektivität und der Robustheit auch dazu führen, dass diverse Technologien bzw. deren Anwendungen in einzelnen Verkehrsbereichen keine ausreichenden Beiträge zu den Zielen des Klimaschutzes und der Nachhaltigkeit erbringen. Aus beiden Gründen ist es wichtig, die Technologieentwicklung und die Markteinführung engmaschig zu begleiten und im Sinne eines lernenden Prozesses regelmäßig zu evaluieren.

Um die Zielstellungen der Effektivität, der Robustheit und des lernenden Prozesses bei der Technologieentwicklung und dem -Hochlauf erreichen zu können, empfehlen sich zum heutigen Zeitpunkt aus energie- und gesamtsystemischer Sicht die folgenden **Weichenstellungen bei der Markteinführung**.

Ein fokussierter Ausbau der Kapazitäten erneuerbarer Energien (EE) ist eine wesentliche Grundlage für den Produktionshochlauf strombasierter Kraftstoffe (siehe Kap. 3). **Maßnahmen zur Beschleunigung des EE-Ausbaus in Deutschland** sollten weiterverfolgt und ggf. verstärkt werden. Für potenzielle **Importländer** sollten **auf Basis von Nachhaltigkeitskriterien Markteinführungs- bzw. Kooperationsmechanismen** erarbeitet werden. In der Folge können dann Mechanismen zur Anwendung kommen, die den regionalen und weltweiten Handel mit Wasserstoff bzw. synthetischen Kraftstoffen ermöglichen und stärken. Solche Mechanismen können heute schon mit den Staaten, die eine ausreichende „H₂-readiness“²⁸ (Ausmaß, in dem die Voraussetzungen für eine gegenwärtige oder zukünftige Produktion von Wasserstoff gegeben sind) und eine deklarierte Exportorientierung aufweisen, umgesetzt und weiter ausdifferenziert bzw. verfeinert werden.

Die **Markteinführung muss im Sinne der SDGs nachhaltig ausgestaltet werden**. Für die Produktion synthetischer Kraftstoffe wird eine entsprechende Nachhaltigkeitszertifizierung im In- und Ausland benötigt, die auf verbindlichen Nachhaltigkeitskriterien basiert. Dies betrifft sowohl die Importe als auch die Etablierung regionaler bzw. in der EU basierter Wertschöpfungsketten. Beides dient in der Summe dem Aufbau resilienter Versorgungsstrukturen.

Aufgrund des sukzessiven Aufbaus von Produktionsstrukturen für synthetische Kraftstoffe können nicht alle Bereiche des Verkehrssektors gleichzeitig in ausreichenden Mengen mit synthetischen Kraftstoffen versorgt werden. Dementsprechend sollte auch aus Nachhaltigkeitsperspektive **eine klare Priorisierung innerhalb des Verkehrssektors entsprechend der Verfügbarkeit von Alternativen** sowie des THG-Reduktionspotenzials, vorgenommen werden; gleichzeitig müssen die Bedarfe der Industrie (zur Substitution von Erdölderivaten in der Grundstoffchemie und in besonders energieintensiven Prozessen²⁹) bedacht werden.

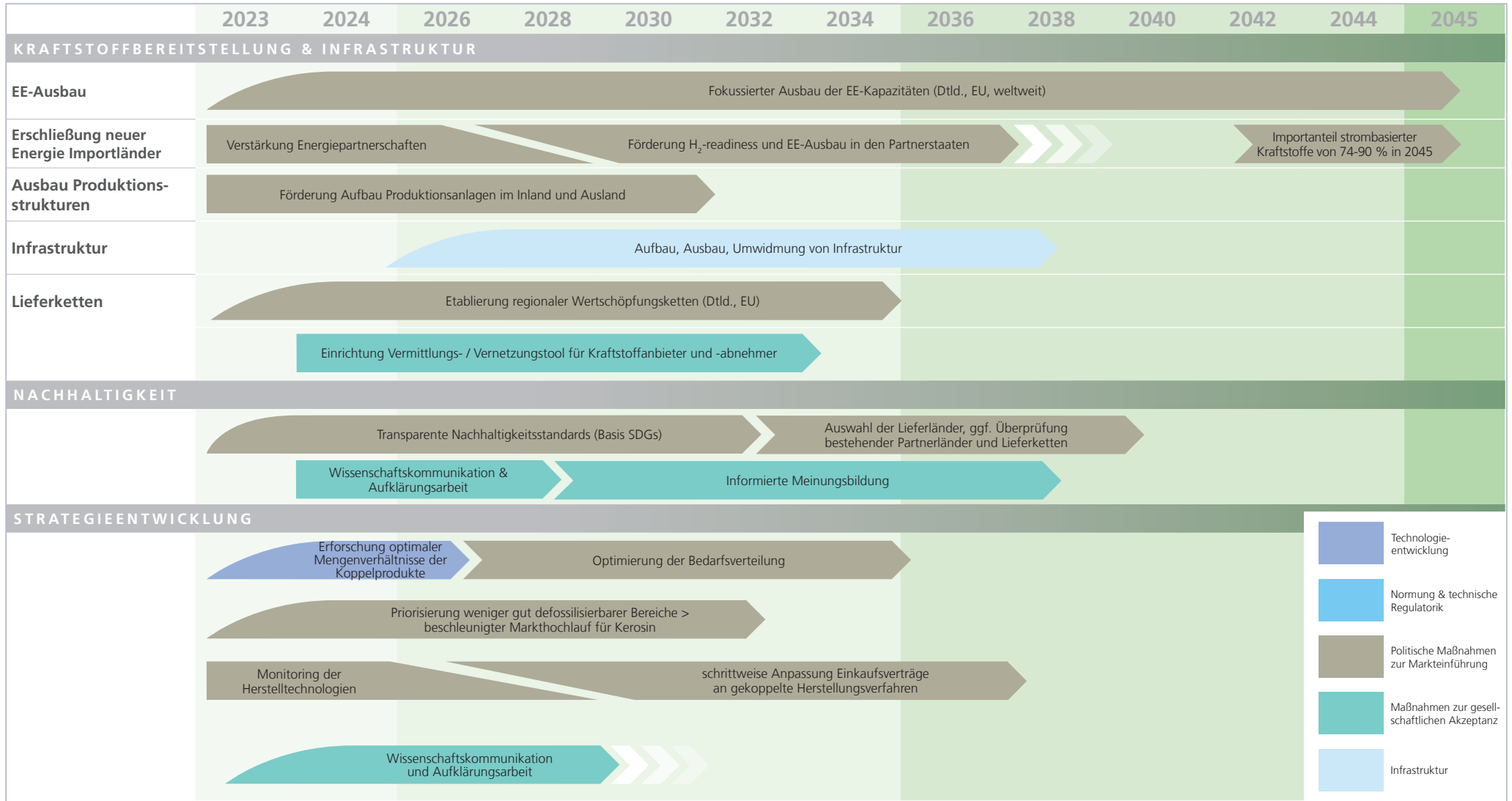


Abbildung 10: Roadmap zum Produktionshochlauf und der Markteinführung synthetischer Kraftstoffe

Nachfrageseitig **werden sich die erforderlichen Kraftstoffanteile in den Bereichen des Verkehrssektors mit der Zeit verändern**. Dazu wird eine **sektorübergreifende Strategie** für den Ausbau der Produktionskapazitäten strombasierter Kraftstoffe benötigt. Dies betrifft zum einen die Bedarfsverteilung innerhalb des Verkehrssektors (Anteile an Kerosin, Diesel und Benzin) sowie zum anderen die Bedarfe anderer Anwendungen, v.a. in der chemischen Industrie. Je nach gewählter Prozessroute (Fischer-Tropsch (FT) oder Methanol) ergeben sich auch Koppelprodukte, die in mehreren Sektoren einsetzbar sind. Daher ist es wichtig zu erforschen, in welchen **optimalen Mengenverhältnissen** die jeweiligen Kraftstoffe, insbesondere strombasiertes Kerosin, herstellbar sind und welche Angebots- und Nachfragerelationen sich für die Koppelprodukte ergeben. Die Mengenverhältnisse sollten so eingestellt werden, dass einerseits ein langfristiger Absatz gesichert ist und andererseits möglichst wenige Strukturen geschaffen werden, die nicht langfristig benötigt werden (sowohl in Bezug auf die Herstellung als auch hinsichtlich aufzubauender Transportinfrastrukturen).

Im Sinne der Schaffung guter Akzeptanzvoraussetzungen sollte **jeder wichtige Schritt zur Markteinführung** synthetischer Kraftstoffe **durch Kommunikationsmaßnahmen vorbereitet bzw. von solchen begleitet werden**. Ein wichtiges Ziel der Kommunikationsarbeit ist dabei der Abbau von Unsicherheiten bei den Akteuren. Aktuell stellen allerdings noch bestehende Unklarheiten und offene Fragen zugleich eine Herausforderung für die Kommunikation dar (z.B. Mengenverfügbarkeiten, erwartbare Preise, ausstehende – oft politische – Entscheidungen). Dennoch sollte frühzeitig, fortlaufend und transparent über wichtige Aspekte der Markteinführung von strombasierten Kraftstoffen informiert werden. Dabei ist je nach Frage- und Zielstellung eine Kommunikationsmaßnahme zu wählen, die bedarfs- und adressatenorientiert entweder gezielt bestimmte Akteursgruppen oder breitere Kreise der Öffentlichkeit anspricht.

Durch eine **breit angelegte Wissenschaftskommunikation und Aufklärungsarbeit** sollten alle potenziellen Nutzer von strombasierten Kraftstoffen über grundlegende Aspekte dieser Produkte (und der Technologien zu ihrer Herstellung) informiert werden, z.B. hinsichtlich Sinn und Zweck (Notwendigkeit) der Einführung synthetischer Kraftstoffe, Nachhaltigkeitskriterien der Herstellung oder Kosten für Verbraucher. Dies bildet eine Basis zur informierten Meinungsbildung.

An speziellere Akteursgruppen auf der Produzenten- und Konsumentenebene wäre eine weitere Maßnahme gerichtet. Die Einrichtung eines Kommunikationstools bzw. einer Vermittlungs- oder Vernetzungs-Plattform könnte dazu beitragen, dass (potenzielle) Hersteller und Konsumenten von synthetischen Kraftstoffen zusammenfinden und die auf Angebots- wie Nachfrageseite bestehenden Unsicherheiten bzgl. möglicher, verlässlicher Liefer- und Abnahmemengen reduziert werden.

Tabelle 1: Übergeordnete Kommunikationsmaßnahmen zur Begleitung der Markteinführung von strombasierten Kraftstoffen, alle Verkehrsbereiche

| Akteursgruppe | Datenquelle | Befund und Bedarfsableitung | Kommunikationsmaßnahme |
|---|---|--|--|
| Alle (bes. Verbraucher bzw. potenzielle Nutzer von synth. Kraftstoffen) | Interviews, Befragungen und Medienanalysen | Grundlegender Informationsbedarf bei Nicht-Experten bzgl. synth. Kraftstoffe | Breit angelegte Maßnahmen der Wissenschaftskommunikation & Aufklärungsarbeit |
| Kraftstoffproduzenten, -anbieter und -kunden (Flughäfen/Airlines, Häfen/Schiffsbetreiber) | Experten-Interviews aus Luft- und Schifffahrt | Unsicherheiten auf Angebots- und Nachfrageseite bzgl. Kraftstoffmengen -> Bedarf nach mehr Sicherheit bei Produktabsatz bzw. Kraftstofflieferungen | Vermittlungs-/Vernetzungstool zur unterstützten Zusammenführung von Kraftstoffanbietern und -abnehmern |

Um die **gesellschaftlichen Zielsetzungen der Defossilisierung des Verkehrssektors robust** umsetzen zu können, ist neben der Einführung synthetischer Kraftstoffe ein Bündel weiterer Maßnahmen nötig. Hierzu gehören insbesondere die **Verkehrsvermeidung und -verlagerung**.³⁰

Die hier modellierten Szenarien gehen (gemäß der EU-Core-Szenarien) von einer moderaten Zunahme des Verkehrsaufkommens aus. Sollte diese Annahme eintreten, bedeutet dies für eine robuste Defossilisierungsstrategie, dass eine schnelle Elektrifizierung des bodengebundenen Verkehrs und eine Reduktion des fossil betriebenen Bestands unerlässlich sein wird, um die verfügbaren Mengen dort nutzen zu können, wo die Defossilisierung weitaus schwieriger ist. Hinsichtlich des Verkehrs betrifft dies v.a. die Luft- und Schifffahrt.

5. KRAFTSTOFFOPTIONEN IN DEN VERKEHRSBEREICHEN

In den drei Verkehrsbereichen Luft-, Schifffahrt und Straßenverkehr bieten synthetische bio- und strombasierte Kraftstoffe jeweils unterschiedliche Potenziale für die Defossilisierung der Mobilität. Zudem werden im Folgenden auch die unterschiedlichen Kraftstoffoptionen analysiert.

Der Schwerpunkt der Kraftstoff-Roadmap lag im Begleitprojekt BEniVer auf den (hauptsächlich strombasierten) Kraftstoffoptionen, die von den begleiteten Projektvorhaben erforscht wurden. Biobasierte Kraftstoffe und alternative Antriebsoptionen wie Brennstoffzellen und batterieelektrische Fahrzeuge waren nicht zentraler Gegenstand der Forschungsbegleitung. Bei der Einordnung der Rolle synthetischer Kraftstoffe wurden sie am Rande berücksichtigt. Bei der Bewertung der Kraftstoffoptionen der Projektvorhaben wurden sie nicht betrachtet.

5.1 ROLLE SYNTHETISCHER KRAFTSTOFFE IN DER LUFTFAHRT

Die Defossilisierung des globalen Luftverkehrs ist derzeit aus technischer Sicht bis 2045 überwiegend nur durch die Nutzung synthetischer Kerosine umsetzbar. Da Flugzeuge eine lange Lebensdauer, von bis zu 30 Jahren oder mehr, haben und daher bei heutiger Indienststellung noch bis mindestens 2050 im Einsatz sein werden, ist es unumgänglich, dass ein neuer, synthetischer Treibstoff mit der heutigen Flugzeug-Technologie kompatibel ist. Es gibt bereits Sustainable Aviation Fuels (SAF), die in der Bestandsflotte direkt (als Drop-In-Treibstoff) genutzt werden können. Power-to-Liquid (PtL)-Treibstoffe, welche ausgehend von der Elektrolyse von Wasser und der Verwertung von CO₂ hergestellt werden, stellen eine Untergruppe der SAF dar.

Ein Drop-In-Kraftstoff bzw. -Treibstoff ist ein synthetischer Kraft-/Treibstoff, der als Blendkomponente oder Reinkraftstoff verwendet werden kann. Dabei sind weder technologische Anpassungen an Motoren bzw. Triebwerken und/oder einzelner Komponenten noch von Materialien notwendig. Drop-in-Kraft-/Treibstoffe sind aus technischer Sicht rückwärtskompatibel, d.h. in bestehenden Fahrzeugen bzw. Schiffen oder Flugzeugen einsetzbar.

Im erheblichen Maße werden die Beimischungsquoten der Bundesregierung, welche bis 2030 eine Quote von 2 % PtL-Treibstoffen vorsieht, und die von weiteren Ländern sowie der EU, zu einer dauerhaften und verlässlichen Nachfragesteigerung nach synthetischen Kraftstoffen beitragen. Die ReFuelEU Aviation-Initiative³¹ als Bestandteil des Fit-for-55-Maßnahmenpakets für den Luftverkehr sieht gegenwärtig eine SAF-Quote von 70 % mit einer PtL-Unterquote von 35 % bis 2050 vor. Grundsätzlich besteht also ein hoher Bedarf für strombasierte Drop-In-Treibstoffe. Diese können graduell mit einer steigenden Beimischungsquote eingesetzt werden, ohne dass eine grundlegende Änderung am System der Treibstofflogistik erforderlich wäre.

Als weitere Technologieoptionen zur Realisierung des klimaneutralen Fliegens wird die direkte Nutzung elektrischen Stroms diskutiert, die allerdings aufgrund der Anforderungen und technischen Eigenschaften im Flugzeugbau stark eingeschränkt sein wird (Nischenanwendungen auf sehr kurzen Strecken). Der Einsatz von Wasserstoff als Treibstoff ist ein vielversprechender Energieträger im Luftverkehr, dessen Nutzung jedoch erhebliche Änderungen im Luftverkehrssystem erfordert (Neukonstruktion von Luftfahrzeugen, Umbau der Energieinfrastruktur an Flughäfen, Versorgung der Flughäfen mit Wasserstoff). Daher wird nicht von einem signifikanten Beitrag vor 2040 ausgegangen.

KRAFTSTOFFOPTIONEN

In der Luftfahrt gibt es im Vergleich zu anderen Sektoren sehr wenig nachhaltige Kraftstoffoptionen, da hier hohe Anforderungen an die Treibstoffeigenschaften bestehen. Aktuell ist ein Beimischungsanteil von maximal 50 % (bezogen auf das Volumen) aus synthetischer Herstellung zu konventionellem (d.h. fossilem) Kerosin möglich. Auch wenn moderne Flugzeuge schon nachweislich in der Lage sind, auch 100 % SAF zu verfliegen³², ist jedoch die praktische Anwendung aufgrund der fehlenden Zertifizierung gesetzlich nicht erlaubt.

Neben den im Rahmen von BEniVer betrachteten strombasierten SAFs sind verschiedene biogene SAFs bereits verfügbar³³. Am bedeutendsten sind hier das HEFA (Hydrogenated Esters and Fatty Acids)-Kerosin, welches überwiegend aus gebrauchten Speiseölen und -fetten hergestellt wird, sowie das AtJ-SPK (Alcohol-to-Jet Synthetic Paraffinic Kerosene), welches auf den Alkoholen Ethanol oder Isobutanol basiert. Die in der Tabelle 2 gezeigten Treibstoffoptionen beziehen sich auf strombasierte Treibstoffe; im Bereich der Infrastruktur und der Anwendbarkeit gelten die hier gemachten Aussagen auch für die biogenen Treibstoffe.

Bezüglich der strombasierten Treibstoffe werden gegenwärtig zwei Syntheseverfahren unterschieden, der FT-Prozess und die Methanol-to-Jet (MtJ)-Route. Die Produkte, d.h. das FT- und MtJ-Kerosin, sind sich hinsichtlich ihrer Zusammensetzung und Eigenschaften ähnlich und können aus technischer Sicht beide als SAF eingesetzt werden. Aktuell besteht hier nur ein Unterschied in der Zulassung. Während das FT-Kerosin als SAF in einem Blend verwendet werden darf, sind synthetische Kerosine, welche über die MtJ-Route hergestellt werden, noch nicht für die Nutzung freigegeben.

Synthetisches Kerosin ist auf absehbare Zeit die einzige Option, um Mittel- und Langstreckenflüge klimaneutral zu gestalten. Dabei geht die positive Klimawirkung durch ein 100 % SAF über die CO₂-Neutralität hinaus, da hier auch eine deutliche Reduktion von Nicht-CO₂-Effekten möglich ist, welche den überwiegenden Anteil (etwa zwei Drittel) der Klimawirkung der Luftfahrt ausmachen.

Tabelle 2: Übersicht zur Bewertung der Treibstoffoptionen in der Luftfahrt* (● vorteilhaft, ● unvorteilhaft, ● nachteilig)

| | Blend mit 50 % _{vol} SAF | 100 % SAF |
|---|--|--|
| Treibstoffherstellung | <ul style="list-style-type: none"> ● Aufwändige Herstellung ● Entstehung von Nebenprodukten | <ul style="list-style-type: none"> ● Aufwändige Herstellung ● Entstehung von Nebenprodukten |
| Infrastrukturverfügbarkeit | <ul style="list-style-type: none"> ● Vorhandene Infrastruktur kann aus technischer Sicht genutzt werden ● Offen, ob uneingeschränkte Nutzung möglich, v.a. wegen Kosten | <ul style="list-style-type: none"> ● Vorhandene Infrastruktur kann aus technischer Sicht genutzt werden ● Offen, ob uneingeschränkte Nutzung möglich, v.a. wegen Kosten → evtl. parallele Infrastruktur an Flughäfen notwendig |
| Anwendbarkeit (Drop-In/Blend/Triebwerksanpassung) | <ul style="list-style-type: none"> ● Erfüllt ASTM D7566 → vollständig kompatibel mit Bestandsflotte ● Höhere Treibstoffkosten | <ul style="list-style-type: none"> ● Aus technischer Sicht kompatibel ● Effizientere Verbrennung ● Falls Austausch von Dichtungen, Ventilen,... erforderlich, kann dies im Rahmen von regulärer Wartung erfolgen ● Evtl. öfter Inspektion/Wartung notwendig wg. Materialverträglichkeit ● Keine ASTM-Zulassung ● Höhere Treibstoffkosten |
| Schadstoff-Emissionen | <ul style="list-style-type: none"> ● Minderung Emissionen im Vgl. zu reinem, fossilem Kerosin | <ul style="list-style-type: none"> ● Deutlich stärkere Emissionsminderung, einschließlich der Nicht-CO₂-Effekte |
| F&E-Bedarfe | <ul style="list-style-type: none"> ● Logistik und Handhabung großer Mengen SAF unterschiedlicher Herkunft ● Verfügbarkeit von Rohstoffquellen für biogene SAF ● „Fuel-Design“ | <ul style="list-style-type: none"> ● Logistik und Handhabung großer Mengen SAF unterschiedlicher Herkunft ● Verfügbarkeit von Rohstoffquellen für biogene SAF ● „Fuel-Design“ |
| Begleitete EiV-Forschungsvorhaben | <ul style="list-style-type: none"> ● KEROSyN100 ● PowerFuel | |

* Die hier aufgeführten Treibstoffoptionen beziehen sich auf generische Kraftstoffpfade und stellen eine Auswahl der von den begleiteten EiV-Forschungsvorhaben beforschten Treibstoffe dar. Daneben wurden noch weitere Treibstoffe betrachtet und in der BEniVer Roadmap beschrieben.

ROADMAP LUFTFAHRT

Durch die extrem hohen Sicherheitsanforderungen in der Luftfahrt ist die Einführung eines neuen Treibstoffes grundsätzlich mit einem sehr hohen finanziellen und zeitlichen Aufwand verbunden. Die Markteinführung von neuen SAFs erfordert durch die Zertifizierung und den damit einhergehenden aufwändigen Test- und Zulassungsverfahren die Bereitstellung großer Mengen des jeweiligen Treibstoffes. Dies bedeutet einen hohen wirtschaftlichen Aufwand für die Entwickler.

Die ASTM-Norm D7566³⁴ gewährleistet die Drop-In-Fähigkeit zugelassener synthetischer Treibstoffe und die vollständige Kompatibilität bei einem Einsatz mit allen Flugzeugen, unabhängig von deren Alter oder Ausstattung. Um die derzeit nicht zugelassenen 100 % SAF-Treibstoffe in Flugzeugen zu nutzen, ist auch eine Differenzierung in den Regularien bzw. eine Teilzulassung eine mögliche Option; z.B. wäre eine Zulassung eines 100 % SAF für nur moderne bzw. explizit durch die Hersteller definierte Flugzeugmodelle denkbar. Als überwiegend international agierender Sektor ist in der Luftfahrtbranche für die Umsetzung und Einführung von reinen SAF-Treibstoffen ein international abgestimmtes Vorgehen notwendig.

Als weitere Herausforderung für eine effektive Marktdurchdringung sind v.a. die höheren Treibstoffkosten zu nennen, welche die allgemeine Akzeptanz für synthetische Treibstoffe mindern könnten. Hier bedarf es daher einer finanziellen Förderung bzw. Subventionen für die synthetischen Treibstoffe und/oder einen Aufpreis beim fossilen Kerosin, um eine breite Akzeptanz und eine schnelle Markteinführung zu realisieren. Eine weitere Kostenreduzierung könnte auch durch den Ausbau der Produktionskapazitäten ermöglicht werden. Mit der Zulassung des Central European Pipeline System (CEPS) für die Verteilung von SAF Anfang 2023^{35, 36}, ist auch eine breite Versorgung europäischer Flughäfen möglich. Wäre an einem Flughafen kein SAF vorhanden, könnte ein Book&Claim-Ansatz die Möglichkeit bieten, SAF zu erwerben ohne dass es direkt verflogen wird³⁷. Wie im Kapitel 3 bereits angedeutet, zeichnet sich ab, dass allgemein die Produktion von PtL-Kraft- und Treibstoffen in mehreren kleineren Raffinerien stattfinden wird³⁸, was sich auch auf die Treibstoffinfrastruktur bzw. die breite Versorgung der europäischen Flughäfen mit SAF auswirken wird.

Zusätzlich zu den SAFs sollten bis 2035 auch neue Antriebstechnologien vorhanden sein, zunächst für kleinere Flugzeuge³⁹. Insbesondere die angestrebte Einführung von Wasserstoffflugzeugen zwischen 2035 und 2040 ist gegenwärtig eine Option, um auch Mittelstreckenflüge zu dekarbonisieren. Dies erfordert einen entsprechenden Aufbau einer Wasserstoffinfrastruktur an Flughäfen.

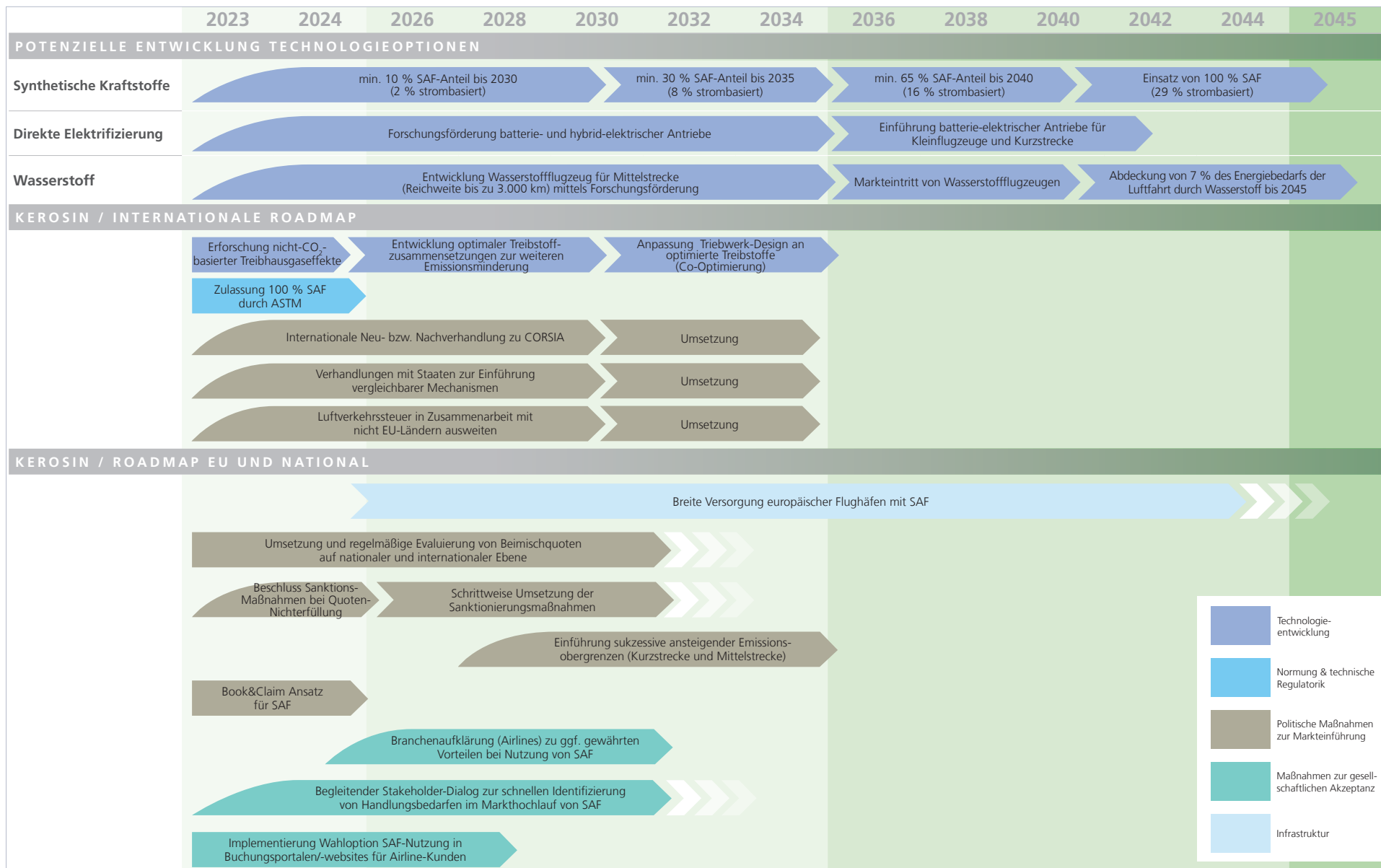


Abbildung 11: Roadmap/Meilensteine für den Einsatz von SAF in der Luftfahrt

5.2 ROLLE SYNTHETISCHER KRAFTSTOFFE IN DER SCHIFFFAHRT

Die Schifffahrt hat einen Anteil von 2,9 % an den weltweiten CO₂-Emissionen. Der Anteil von Schiffsdiesel und Schweröl beträgt 97 % (davon 79 % Schweröl) am gesamten Kraftstoffverbrauch.⁴⁰ **Der überwiegende Anteil des Schiffsverkehrs kann aus heutiger, technischer Sicht bis 2045 nur durch synthetische Kraftstoffe defossilisiert werden**, um den hohen Anforderungen hinsichtlich Reichweite und Last im maritimem Verkehrssektor gerecht zu werden. Optionen und Möglichkeiten zur Minderung von Schadstoffemissionen in der Schifffahrt bieten die Nutzung von verschiedenen synthetischen Kraftstoffen sowie der direkt elektrische Betrieb. Rein elektrisch betriebene Schiffe werden für kurze Strecken (kleiner 100 nautische Meilen) in der Binnenschifffahrt, wie Fähren oder Ausflugsboote, bereits vereinzelt eingesetzt. Sie haben jedoch für die maritime Schifffahrt mangels Kapazität bzw. Reichweite kein Potenzial, auch langfristig gesehen.

Der Einsatz drop-in-fähiger, strombasierter Kraftstoffe spielt in der Schifffahrt eine entscheidende Rolle zur CO₂-Minderung, da sie die direkte Weiternutzung vorhandener Schiffe (Lebensdauer teilweise über 30 Jahre in der Hochseeschifffahrt) und Infrastrukturen für die Kraftstoff-Versorgung ermöglichen. Weiteres Potenzial liegt in der Tatsache, dass Schadstoffemissionen, v.a. hinsichtlich der Rußemissionen, deutlich reduziert und Schwefeloxid (SO_x)-Emissionen gänzlich vermieden werden können. Darüber hinaus versprechen Synergieeffekte bei der Anwendung neuer Kraftstoffe, durch eine optimierte, effiziente Logistik und Verteilungsinfrastruktur (z.B. für Methanol und Ammoniak), weiteres Treibhausgas (THG)-Minderungspotenzial. Allerdings müssen die Emissionen von weiteren Klimagasen wie Methan und Lachgas vermieden werden.

KRAFTSTOFFOPTIONEN

In der Schifffahrt ist derzeit noch keine verlässliche Festlegung auf den oder die zukünftig optimalen Kraftstoff(e) möglich. Langfristig zeichnet sich **Methanol** als strombasierter Kraftstoff mit hohem Potenzial ab. Aufgrund der geringen Emissionen ist Methanol in allen Bereichen der Schifffahrt (d.h. für die Hochseeschifffahrt, in Küstenregionen und auf Flüssen) einsetzbar, allerdings nur bedingt in bestehenden Schiffen. Kurzfristig sind daher Drop-In-Kraftstoffe notwendig, wie z.B. **FT-Diesel** oder synthetisches **Liquidified Natural Gas** (LNG), die eine direkte Weiternutzung vorhandener Schiffe erlauben. Weitere Optionen und Möglichkeiten zur Minderung von Schadstoff- und THG-Emissionen bieten die Nutzung von anderen oxygenierten Kraftstoffen (z.B. Oxymethylenether **OME**) und der Einsatz von **Wasserstoff** oder **Ammoniak**.

Im Rahmen dieser Ausarbeitung ist bei Wasserstoff der so genannte „grüne“ Wasserstoff gemeint. Gemäß der Einordnung des Nationalen Wasserstoffrates stammt hierbei der Strom zur Erzeugung des Wasserstoffs aus erneuerbaren Energien.⁶³

Tabelle 3: Übersicht zur Bewertung der Kraftstoffoptionen in der Schifffahrt* (● vorteilhaft, ● unvorteilhaft, ● nachteilig)

| | Paraffinischer Diesel (FT) | Methan (synth. LNG) | Methanol | Oxymethylenether (OME) | Wasserstoff | Ammoniak |
|--|---|--|--|--|---|---|
| Kraftstoffherstellung | <ul style="list-style-type: none"> ● Aufwändige Herstellung (teuer) ● Entstehung von Nebenprodukten | <ul style="list-style-type: none"> ● Niedrigere Kosten ● Sehr reine Herstellung möglich ● CO₂-aktiver Prozess ● Maximaler Energieanteil pro C-Atom | <ul style="list-style-type: none"> ● Sehr reine Herstellung möglich ● CO₂-aktiver Prozess ● Energieanteil pro C-Atom nicht allzu hoch, da teil-oxidierter Kohlenstoff | <ul style="list-style-type: none"> ● Herstellung über Methanol → zusätzlicher Prozessschritt | <ul style="list-style-type: none"> ● Kein DAC oder andere C-Quelle notwendig | <ul style="list-style-type: none"> ● Kein DAC oder andere C-Quelle notwendig |
| Infrastrukturverfügbarkeit | <ul style="list-style-type: none"> ● Bestehende Infrastruktur kann genutzt werden | <ul style="list-style-type: none"> ● Globale Infrastruktur teilweise vorhanden ● Betankung bisher nur über Bunkerschiffe, LNG-Terminals notwendig | <ul style="list-style-type: none"> ● Globale Infrastruktur vorhanden, Ausbau für Schifffahrt notwendig | <ul style="list-style-type: none"> ● Bislang nicht vorhanden; Nutzung bestehender Systeme abhängig vom Anteil der Beimischung | <ul style="list-style-type: none"> ● Globale Infrastruktur teilweise vorhanden, Ausbau für Schifffahrt notwendig, aber aufwändiger | <ul style="list-style-type: none"> ● Globale Infrastruktur vorhanden, Ausbau für Schifffahrt notwendig |
| Anwendbarkeit (Drop-In/Blend/Motorenanpassung) | <ul style="list-style-type: none"> ● Ersatz für MGO/HFO (90 % der Schiffe) ● Anpassung Motorsteuerung ggf. nötig | <ul style="list-style-type: none"> ● Direkter Ersatz für fossiles LNG ● Geringere Kraftstoffkosten als FT-Diesel ● Anteil LNG-Schiffe <10 % ● Nutzungskonkurrenz zum Energiesektor ● Umrüstung von MGO/HFO-Schiffen notwendig ● Geringere Energiedichte als Diesel → größerer Tank reduziert Ladung oder geringere Reichweite | <ul style="list-style-type: none"> ● Entwicklung Methanol-Schiffe nahezu ausgereift, einzelne Schiffe im Einsatz ● Förderung durch global Player wie Maersk ● Bislang keine Norm, nur Einzelzulassung ● Energiedichte nur etwa halb so groß wie Diesel → größerer Tank reduziert Ladung oder geringere Reichweite ● Kaum Bestand, Anpassung von Diesel-Schiffen notwendig | <ul style="list-style-type: none"> ● Geringe Materialverträglichkeit → max. 10-15% OME zumischbar | <ul style="list-style-type: none"> ● Einzelne Testanwendungen, aber noch keine ausgereifte Technologie ● Geringe Energiedichte (geringere Reichweite) ● Bislang keine Norm | <ul style="list-style-type: none"> ● Nutzungskonkurrenz zu Chemieindustrie, v.a. Düngemittel ● Inkompatibel mit bestehenden Motoren ● Technologie noch in Entwicklung, bislang kein einsatzfähiges Schiff bekannt ● Toxizität → Anwendung nur für Hochseefrachter ● Bislang keine Norm |
| Schadstoff-Emissionen | <ul style="list-style-type: none"> ● Deutliche Reduzierung der Rußemissionen im Vgl. zu MGO/HFO ● Keinerlei SO_x-Emissionen ● Im Vgl. zu anderen syn. Kraftstoffen fällt Emissionsminderung geringer aus | <ul style="list-style-type: none"> ● Deutliche Emissionsminderung, z.B. können TierIII-Grenzwerte für NO_x eingehalten werden ● Keinerlei SO_x-Emissionen ● Methanschlupf muss vermieden werden | <ul style="list-style-type: none"> ● Deutliche Emissionsminderung, ggf. keine Abgasnachbehandlung notwendig ● Größtes Potenzial innerhalb C-haltiger Kraftstoffe bzgl. Minderung Rußemission ● Keinerlei SO_x-Emissionen | <ul style="list-style-type: none"> ● Reduzierung SO_x- und Rußemissionen bei Verwendung als Blendkomponente | <ul style="list-style-type: none"> ● Keine C-haltigen Emissionen mehr, also auch kein CO₂ ● Keinerlei SO_x-Emissionen | <ul style="list-style-type: none"> ● Keine C-haltigen Emissionen mehr, also auch kein CO₂ ● Keinerlei SO_x-Emissionen ● Mehr NO_x- und N₂O-Emissionen möglich |
| THG-Bilanz | <ul style="list-style-type: none"> ● Relativ etwas höhere THG-Emissionen | <ul style="list-style-type: none"> ● Relativ geringe THG-Emissionen ● CH₄-Emissionen möglich | <ul style="list-style-type: none"> ● Relativ geringe THG-Emissionen | | <ul style="list-style-type: none"> ● Keine C-haltigen Emissionen mehr | <ul style="list-style-type: none"> ● Keine C-haltigen Emissionen mehr ● N₂O-Emissionen möglich |

| | Paraffinischer Diesel (FT) | Methan (synth. LNG) | Methanol | Oxymethylenether (OME) | Wasserstoff | Ammoniak |
|-----------------------------------|---|--|---|---|---|--|
| F&E-Bedarfe | <ul style="list-style-type: none"> Abgasnachbehandlung Motorsteuerung Schmiereigenschaften | <ul style="list-style-type: none"> Minimierung und Vermeidung des Methanschlupfes Weiterentwicklung der Umrüstung von MGO/HFO-Schiffen auf reines Methan → Tanks so verbauen, dass keine Einbußen bei Ladung | <ul style="list-style-type: none"> Weiterentwicklung der Umrüstung von MGO/HFO-Schiffen auf reines Methanol → Tanks so verbauen, dass keine Einbußen bei Ladung Komponenten (Motor, Tank- und Einspritzsysteme) Material (v.a. metallische Werkstoffe → Korrosion) | <ul style="list-style-type: none"> Komponenten (Motor, Tank- und Einspritzsysteme) Material (v.a. Kunststoffdichtungen) | <ul style="list-style-type: none"> Art der Anwendung (direkte Verbrennung oder Brennstoffzelle) Speicherung (flüssig, gasförmig, LOHC) Komponenten (Motor, Tank- und Einspritzsysteme) Material | <ul style="list-style-type: none"> Minimierung und Vermeidung von NO_x- und N₂O-Emissionen Abgasnachbehandlung Art der Anwendung (direkte Verbrennung oder Brennstoffzelle) Speicherung (flüssig, gasförmig) Komponenten (Motor, Tank- und Einspritzsysteme) Material Maßnahmen im Havariefall |
| Begleitete Eiv-Forschungsvorhaben | PlasmaFuel | E2Fuels MethQuest | C3-Mobility MethQuest E2Fuels SynLink | ISystem4EFuel | | AmmoniaMot AmmoniakMotor (beide nicht in Eiv) |

* Die hier aufgeführten Kraftstoffoptionen beziehen sich auf generische Kraftstoffpfade und stellen eine Auswahl der von den begleiteten Eiv-Forschungsvorhaben beforschten Kraftstoffarten dar. Daneben wurden noch verschiedene weitere Kraftstoffe betrachtet und in der BEniVer Roadmap beschrieben.

ROADMAP SCHIFFFAHRT

Bei der Einführung strombasierter Kraftstoffe erfordert der maritime Verkehrssektor eine international abgestimmte Vorgehensweise, da über 87 % der CO₂-Emissionen, die durch die Schifffahrt verursacht werden, auf die internationale Schifffahrt entfallen. **Es bedarf einheitlicher internationaler Regularien**, bspw. durch Einbindung der International Maritime Organization (IMO), wie auch einem **Ausbau globaler Infrastrukturen** zur Sicherstellung der Kraftstoffversorgung in den Häfen. Darüber hinaus bringen die unterschiedlichen Einsatzbereiche wie z.B. die Binnenschifffahrt, Hochseeschifffahrt, Frachtschifffahrt und Personenschifffahrt sehr unterschiedliche Herausforderungen mit sich.

Wie auch in anderen Bereichen besteht eine zentrale Herausforderung für eine erfolgreiche Markteinführung durch das **höhere Preisniveau der neuen, strombasierten Kraftstoffe** und dessen Auswirkungen auf den globalen Handel und Wettbewerb. Während es für den bodengebundenen Verkehr, wie auch für die Luftfahrt, Quoten bzw. Vorgaben für den Einsatz synthetischer Kraftstoffe gibt, existieren solche Vorgaben für die Schifffahrtskraftstoffe bislang nicht. Der im Rahmen des EU-Klimapaketes „Fit-for-55“ ausgearbeitete Vorschlag zur Verordnung „FuelEU Maritime“⁴¹ sieht bislang zwar Ziele zur Minderung von Treibhausgasemissionen vor. Konkrete Quoten für synthetische Kraftstoffe, welche deren Einsatz fördern würden, sind hier jedoch bislang nicht enthalten; es gibt aber Bestrebungen diese zu ergänzen.

Tabelle 3 zeigt, dass es in der Schifffahrt eine Vielfalt an alternativen Kraftstoffoptionen gibt, welche alle auch in anderen Sektoren (z.B. mit Energieversorgung, Chemieindustrie, Luftfahrt) benötigt werden. Hier gilt es durch optimierte Produktionsverfahren sowie einer effizienten Logistik und Verteilungsinfrastruktur das **Potenzial von Synergieeffekten und Koppelprodukten** auszunutzen.

Die sofortige Nutzung von Drop-In-Kraftstoffen, v.a. von synthetischem Diesel, wäre ein erster wichtiger Meilenstein auf dem Weg zu einer klimaneutralen Schifffahrt. Mit der Umrüstung von Dieselschiffen auf synthetisches LNG⁴², der Einführung von Methanolantrieben^{43, 44} und der Erprobung eines Wasserstoffschiffes⁴⁵ sind bereits weitere Meilensteine für die Einführung synthetischer Kraftstoffe in der Schifffahrt genommen. Diese Technologien gilt es hinsichtlich offener Forschungsfragen in den nächsten Jahren weiter zu fördern, sowohl was die **Neuentwicklung von Schiffen als auch die Möglichkeit der Umrüstung von Bestandsschiffen betrifft**⁴⁶. Bzgl. Ammoniak ist gegenwärtig noch kein mit Ammoniak betriebenes Schiff im Einsatz. Es gibt hierzu bereits mehrere Forschungsvorhaben, jeweils mit dem Ziel, in den nächsten Jahren ein Ammoniakschiff zu betreiben^{47, 48, 49}.

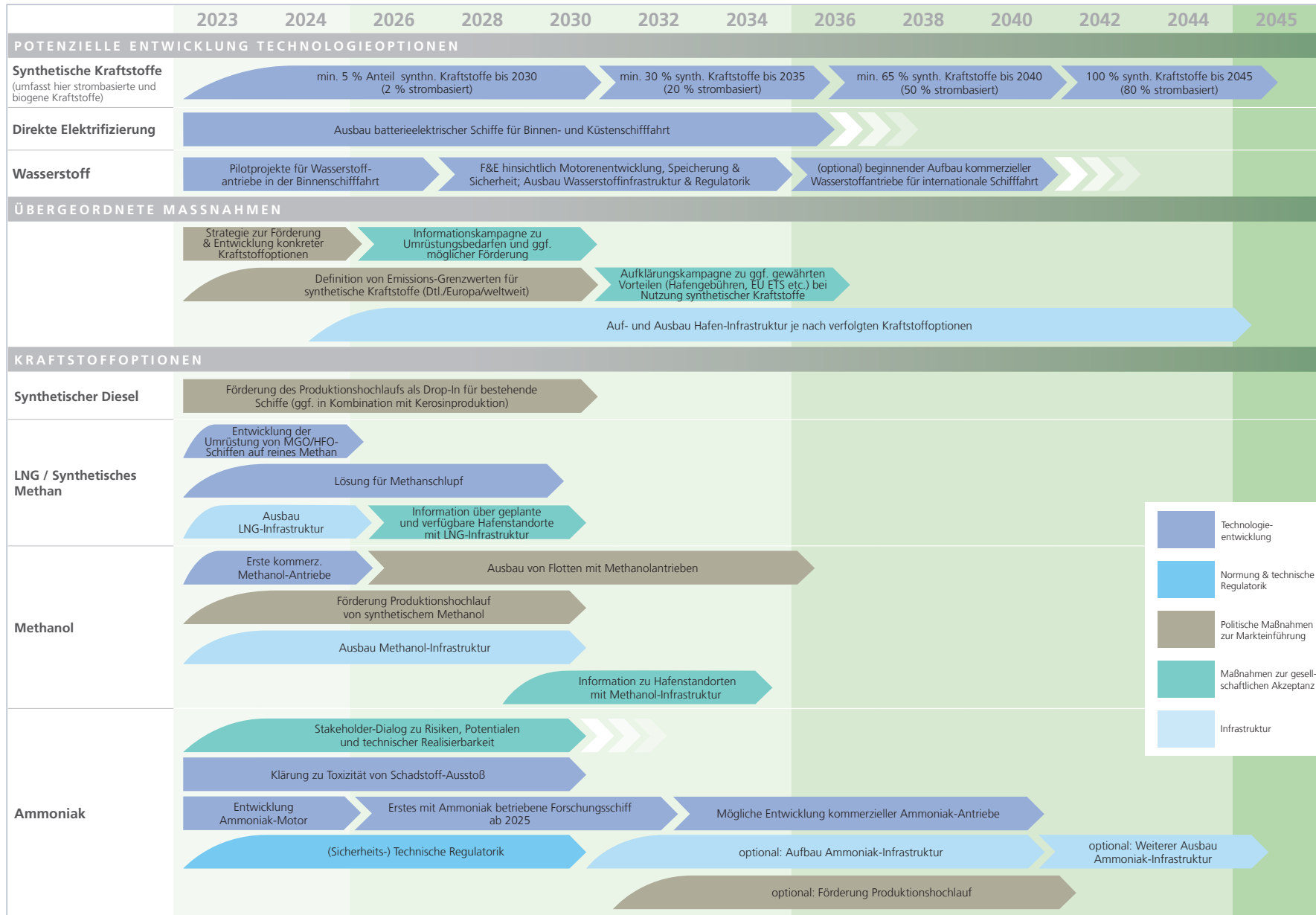


Abbildung 12: Roadmap in der Schifffahrt – Technologieoptionen und übergeordnete Maßnahmen

5.3 ROLLE SYNTHETISCHER KRAFTSTOFFE IM STRASSENVERKEHR

Die klimarelevanten Emissionen im Straßenverkehr beliefen sich im Jahr 2021 auf 145 Mio. Tonnen CO₂-Äquivalente. Dies entspricht 19,3 % der gesamten Emissionen in Deutschland.^{50, 51} Für die Erreichung der deutschen Klimaziele im Verkehrsbereich von maximal 85 Mio. Tonnen CO₂-Äquivalente im Jahr 2030, bis zur Klimaneutralität im Jahr 2045, müssen fossile Kraftstoffe sukzessive ersetzt werden. Hierfür sind technologische Lösungen notwendig, wie der Einsatz von Nullemissionsfahrzeugen oder die Verwendung synthetischer Kraftstoffe.

Die Aufgabe der Begleitforschung BEniVer war die Analyse und Bewertungen der Kraftstoffoptionen, die von den 16 begleiteten Projektvorhaben erforscht wurden (siehe Kapitel 1). Alternative Antriebsoptionen, wie batterieelektrische Fahrzeuge oder bio-basierte Kraftstoffe waren nicht Gegenstand der Forschungsbegleitung und somit auch nicht im Fokus der Analysen.

Strombasierte Kraftstoffe als Option zur Defossilisierung bieten den Vorteil, Energie mit gewohnt hoher Dichte wie fossile Kraftstoffe zu speichern, wodurch hohe Reichweiten der Fahrzeuge ermöglicht werden. Eine Reihe strombasierter Kraftstoffe haben außerdem das Potenzial, reibungslos in die bestehende Infrastruktur integriert werden zu können, also mit den bestehenden Systemen kompatibel zu sein. Dies ist insbesondere für die Defossilisierung der Bestandsflotte notwendig – am 1. Januar 2022 waren in Deutschland allein 58,6 Millionen Fahrzeuge zugelassen⁵².

Welche Fahrzeugtechnologien in Europa verkauft werden können, wird entscheidend von der CO₂-Flottenregulierung der EU geprägt. So sieht die Regulierung in ihrer aktuellen Ausgestaltung vor, dass bis 2030 die durchschnittlichen CO₂-Emissionen der Neuzulassungen von Pkw um 37,5 % gegenüber 2021 sinken müssen⁵³, die der leichten Nutzfahrzeuge um 31 % und die der schweren Nutzfahrzeuge um 30 %⁵⁴. Im Rahmen des Fit-for-55-Pakets wird die Verordnung EU 2019/631 überarbeitet. Gemäß dem Vorschlag zur Änderung dieser Verordnung vom 14. Juli 2021⁵⁵, soll die Reduktion der Flottenemissionen im Jahr 2030 auf 55 % (Pkw) weiter verschärft werden. Im Jahr 2035 sollen keine Fahrzeuge mit Verbrennungsmotoren mehr zugelassen werden. Am 28.03.2023 wurde allerdings zusätzlich der Vorschlag in die Verordnung aufgenommen, dass Fahrzeuge, welche ausschließlich mit CO₂-neutralen Kraftstoffen betrieben werden, auch nach 2035 noch zugelassen werden dürfen⁵⁶. Die Grenzwerte für den Ausstoß von Luftschadstoffen werden dabei von den EURO-Normen festgelegt, welche in den Mitgliedsstaaten wirksam und somit für alle neu zugelassenen Kraftfahrzeuge verbindlich sind. Im Zuge der Diskussion um die Einführung der neuen Abgasnorm Euro 7, bei der strengere Grenzwerte für Luftschadstoffemissionen gefordert werden⁵⁷, könnten synthetische Kraftstoffe helfen die verschärften Grenzwerte durch vollständigere Verbrennungsvorgänge einzuhalten. Strombasierte Kraftstoffe könnten weiterhin dazu beitragen, die THG-Quote zu erfüllen, welche die Inverkehrbringer von Kraftstoffen bis 2030 verpflichtet stufenweise CO₂-Emissionen zu senken.

Kraftstoffe, die als Beimischungen oder Reinkraftstoffe an Tankstellen angeboten werden, müssen in Deutschland den Anforderungen von Kraftstoffnormen entsprechen. Für die Anwendung im Straßenverkehr hat das Projekt NormAKraft die Normtauglichkeit verschiedener in BEniVer betrachteter strombasierter Kraftstoffe untersucht und deren Eignung in Form von verschiedenen Kraftstoffsteckbriefen bewertet⁵⁸.

Für den Verkauf von Kraftstoffen ist nicht nur die Festlegung des Produktstandards innerhalb einer Norm nötig, sondern auch die Erlaubnis des deutschen Gesetzgebers. Dies ist in der zehnten Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (10. BImSchV, Stand Februar 2023) geregelt. Gemäß dieser Verordnung dürfen ausschließlich folgende Kraftstoffe in Verkehr gebracht werden: Ottokraftstoffe (DIN EN 228), Dieselloskraftstoffe (DIN EN 590), Biodiesel (DIN EN 14214), Ethanol-Kraftstoff E85 (DIN EN 15293), Autogas (DIN EN 589), Erdgas und Biogas (DIN EN 16723-2), Pflanzenölkraftstoffe (Rapsöl, DIN EN 51605) und Wasserstoff (für Brennstoffzellenfahrzeuge, DIN EN 17124). Folglich sind z.B. paraffinische Kraftstoffe, für die sogar bereits eine Kraftstoffnorm existiert (DIN EN 15940) nicht als Reinkraftstoff an deutschen Tankstellen

handelbar. Letzteres soll sich allerdings aufgrund eines Entschließungsantrages der Regierungsfractionen des Bundestages ändern⁵⁹. Dieser fordert die Aufnahme der DIN EN 15940 in die 10. BImSchV und soll „zeitnah“ umgesetzt werden.

Für die Nutzung von neuen Kraftstoffen außerhalb der gängigen Kraftstoffnormen DIN EN 228 oder DIN EN 590 ist außerdem die Freigabe des Fahrzeug-Herstellers wichtig (z.B. beim Einsatz von 100 % paraffinischem Diesel). Bei Bestandsfahrzeugen kann der Hersteller oder Importeur die Nutzung nachträglich freigeben (wie dies z.B. im Falle der Einführung von E10 nötig war). Werden Kraftstoffe, die nicht vom Hersteller freigegeben sind, vom Fahrzeughalter dennoch genutzt, ist es nicht möglich, sich bei Fahrzeugschäden auf die Garantie zu berufen.

KRAFTSTOFFOPTIONEN IM SCHWERLASTVERKEHR

Innerhalb der Verbundvorhaben wurden verschiedene Kraftstoffe und Kraftstoffblends im Schwerlastverkehr untersucht (darunter Diesel, Methanol, OME und DME). Zur besseren Vergleichbarkeit wurden die Kraftstoffe FT-Diesel, synthetisches Methan (LNG) und Methanol ebenfalls als generische Kraftstoffe innerhalb BEniVer abgebildet. Unter den betrachteten strombasierten Kraftstoffen resultiert synthetischer Diesel, sowie synthetisches Methan, als vielversprechendste Optionen für die Anwendung im schweren Nutzfahrzeug für den Langstreckenverkehr. 100 % synthetischer Diesel erfüllt aufgrund der zu geringen Dichte zwar nicht die Norm DIN EN 590 (Dieselkraftstoff), viele aktuelle und zukünftige Motorengenerationen sind allerdings schon für den paraffinischen Kraftstoff freigegeben. Aufgrund der aktuell noch fehlenden Integration der EN 15940 (Norm für synthetische, paraffinische Dieselkraftstoffe) in die 10. BImSchV ist das Tanken des Reinkraftstoffes in Deutschland momentan jedoch nicht möglich. Durch die Rückwärtskompatibilität mit der bestehenden Tankstelleninfrastruktur könnte diese bei Einführung verwendet werden. Da leichte Nutzfahrzeuge aktuell ebenfalls überwiegend mit Diesel betrieben werden, bietet der synthetische Diesel auch in diesem Fall eine vielversprechende Option. Bestehende LNG-Fahrzeuge könnten ohne Probleme mit synthetischem Methan betrieben werden, sodass diese Lösung ebenfalls drop-in-fähig ist, wenn auch nur für einen aktuell niedrigen LNG Fahrzeugbestand.

Für bestimmte Anwendungen könnten Kraftstoffe wie Methanol, DME und OME in Frage kommen. Allerdings dürfen diese Kraftstoffe aktuell aufgrund des Fehlens in der 10. BImSchV nicht als Reinkraftstoffe in den Verkehr gebracht werden. Retrofitpakete für leichte und schwere Nutzfahrzeuge zum Betrieb mit Methanol und DME, zeigen Potenzial bei der Tank-to-Wheel CO₂-Reduktion und Schadstoffemissionsverbesserung. OME und DME könnten aufgrund der rußarmen Verbrennungseigenschaften als Diesel-Ersatzkraftstoff für schwer elektrifizierbare Sektoren in Frage kommen. Interessant wäre die Entwicklung von Motoren, welche im Diesel/OME Mischbetrieb betrieben werden können.

Tabelle 4: Übersicht der Bewertung der strombasierten Kraftstoffpfade für den Schwerlastverkehr (40 t zulässige Gesamtmasse)* (● vorteilhaft, ● unvorteilhaft, ● nachteilig)

| | Synthetischer Diesel (paraffinisch) | Synthetisches Methan (LNG) | Synthetisches Methanol | Oxymethylenether (OME) | Dimethylether (DME) |
|--|---|--|--|--|--|
| Kraftstoffherstellung | ● Hohe Kraftstoffkosten | ● Niedrige Kraftstoffkosten ● Sehr reine Herstellung möglich | ● Niedrige Kraftstoffkosten aber geringer Heizwert | ● Moderate Kraftstoffkosten und geringer Heizwert | ● Moderate Kraftstoffkosten und moderater Heizwert |
| Infrastrukturverfügbarkeit | ● Als Blend (R33 ⁶⁰) teilweise bereits verfügbar ● Aktuell (noch) keine Tankinfrastruktur für reinen paraffinischen Diesel (EN 15940) in Dtl. ● Aufbau benötigter Infrastruktur mit geringem Investitionsaufwand möglich | ● Aktuell erst ca. 100 LNG-Tankstellen verfügbar | ● Aktuell keine Tankinfrastruktur verfügbar | ● Aktuell keine Tankinfrastruktur verfügbar | ● Aktuell keine Tankinfrastruktur verfügbar |
| Anwendbarkeit (Drop-In/Blend/Motorenanpassung) | ● Als Blend (R33) normkonform und damit in allen Dieselfahrzeugen ohne Umrüstung anwendbar ● Fahrzeuge müssen für den Betrieb mit reinem paraffinischem Diesel (DIN EN 15940) vom Hersteller freigegeben werden ● Viele aktuelle Motorgenerationen sind bereits freigegeben z.B. von Scania, Volvo, Mercedes, MAN und andere. ⁶¹ | ● Direkter Ersatz für fossiles LNG ● LNG-Serienfahrzeuge verfügbar ● Anteil LNG-SNF am Fahrzeug-Bestand < 1 % | ● Einzelne Testanwendungen, aber noch keine Serienfahrzeuge mit EU-Zulassung verfügbar ● Geringe Energiedichte (geringere Reichweite) | ● Aktuell nur einzelne Forschungsanwendungen ● Geringe Energiedichte (geringere Reichweite) | ● Aktuell nur einzelne Forschungsanwendungen ● Geringe Energiedichte (geringere Reichweite) |
| Schadstoff-Emissionen aus der Fahrzeugnutzung | ● Verringerte CO-, Ruß- und HC-Emissionen im Vergleich zu konv. Diesel | ● Verringerte CO- und Ruß-Emissionen im Vergleich zu konv. Diesel ● Methanschluß muss vermieden werden | ● Verringerte CO-, Ruß- und HC-Emissionen im Vergleich zu konv. Diesel | ● Verringerte Ruß-Emissionen im Vergleich zu konv. Diesel | ● Verringerte Ruß-Emissionen im Vergleich zu konv. Diesel |
| THG-Bilanz über den gesamten Lebensweg | ● THG-Bilanz etwas höher durch den erhöhten Aufwand für die Kraftstoffproduktion | ● Geringste THG-Bilanz im Vergleich der strombasierten Kraftstoffe, allerdings hohe Unsicherheiten aufgrund von Methanschluß | ● relativ geringe THG-Bilanz im Vergleich der strombasierten Kraftstoffe | | ● relativ geringe THG-Bilanz im Vergleich der strombasierten Kraftstoffe |
| F&E-Bedarfe | ● Integration der DIN EN 15940 in die BImSchV ● Verwendung von paraffinischem Diesel innerhalb der Bestandsflotte absichern ● Freigabe und Optimierung zukünftiger Motorgenerationen für paraffinischen Diesel | ● Minimierung und Vermeidung des Methanschlußes | ● Herausforderungen hinsichtlich der Motorlebensdauer aufgrund von Korrosion und Kavitation | ● Dauerhaltbarkeit von Einspritzkomponenten ● Entwicklung von Motoren mit Diesel/OME Mischbetrieb | ● Korrosionsneigung und Materialverträglichkeit des Kraftstoffes |
| Begleitete Eiv-Forschungsvorhaben | SynLink | | C3-Mobility | E2Fuels | FlexDME |

* Die hier aufgeführten, generischen Kraftstoffpfade stellen eine Auswahl der von den begleiteten Eiv-Forschungsvorhaben beforschten Kraftstoffarten dar. Daneben wurden noch verschiedene weitere Kraftstoffe betrachtet und in der BEniVer Roadmap beschrieben.

KRAFTSTOFFOPTIONEN IM PKW-VERKEHR

Innerhalb der Verbundvorhaben wurden verschiedene Kraftstoffe und Kraftstoffblends im Pkw-Sektor untersucht (darunter FT- und Methanol-to-Gasoline (MtG)-Benzin, Methanol, Methan, OME, DMC und Methylformiat Blends und Hythan). Zur besseren Vergleichbarkeit wurden die Kraftstoffe FT-Benzin, synthetisches Methan (CNG), Methanol und Hythan ebenfalls als generische Kraftstoffe innerhalb der Begleitforschung abgebildet. Unter den betrachteten strombasierten Kraftstoffen resultiert synthetisches Benzin als eine der vielversprechendsten Optionen für die Anwendung in Pkws. Durch die Drop-In-Fähigkeit kann der Kraftstoff im Fahrzeugbestand genutzt werden und es entstehen keine Mehrkosten bei der Fahrzeuganschaffung, bzw. es ist keine Umrüstung des Fahrzeugs notwendig. Die bestehende Tankstelleninfrastruktur kann weiterhin verwendet werden und Reichweite sowie Betankungszeit sind identisch im Vergleich zur Nutzung von fossilem Benzin. Bestehende CNG-Fahrzeuge könnten ohne Probleme mit synthetischem Methan betrieben werden, sodass diese Lösung ebenfalls drop-in-fähig ist, wenn auch nur für einen aktuell niedrigen CNG Fahrzeugbestand.

Es gibt bereits Entwicklungsprojekte zum Einsatz von Methanol im modernen, direkteinspritzendem Ottomotor, welche Effizienz- und Emissionsvorteile gegenüber dem Einsatz von fossilem Benzin aufzeigen. Allerdings bestehen weiterhin Herausforderungen hinsichtlich der Motorlebensdauer aufgrund von Korrosion und Kavitation sowie der Kaltstartfähigkeit des Motors. Interessant wäre die Entwicklung von Dual-Fuel-tauglichen Fahrzeugen welche mit Methanol oder Benzin gefahren werden könnten. Für die weiteren im Verlaufe der Roadmap behandelten synthetischen Kraftstoffe Methylformiat, DMC, 2-Butanol sowie 1-Oktanol fehlt aktuell der Markt im Bereich der Straßenfahrzeuge. Aktuell lassen sich diese Kraftstoffe weder in Bestandsfahrzeugen verwenden, noch gibt es bekannte Normungsvorhaben oder vielversprechende Entwicklungsprojekte für entsprechend speziell ausgelegte Verbrennungsmotoren. Zur Defossilisierung des Straßenverkehrs sind allerdings Kraftstoffe notwendig die drop-in-fähig sind.

Tabelle 5: Übersicht der Bewertung der generischen, strombasierten Kraftstoffpfade für den Pkw-Verkehr* (● vorteilhaft, ● unvorteilhaft, ● nachteilig)

| | Synth. Benzin (FT) | Synth. Methanol | Synth. Methan (CNG) | Synth. Hythan (30 % _{vol} Wasserstoff + 70 % _{vol} Methan) |
|--|---|---|--|---|
| Kraftstoffherstellung | ● Hohe Kraftstoffkosten | ● Niedrige Kraftstoffkosten ● Geringer Heizwert | ● Niedrige Kraftstoffkosten ● Sehr reine Herstellung möglich | ● Höhere Kraftstoffkosten als bei reinem synth. Methan |
| Infrastrukturverfügbarkeit | ● Normkonform mit DIN EN 228 → bestehende Infrastruktur kann verwendet werden | ● Aktuell keine Tankinfrastruktur verfügbar | ● Aktuell erst ca. 850 CNG-Tankstellen verfügbar | ● Aktuell keine Tankinfrastruktur verfügbar |
| Anwendbarkeit (Drop-In/Blend/Motorenanpassung) | ● FT-Benzin als Reinkraftstoff ist normkonform mit der DIN EN 228 und damit 100 % drop-in-fähig | ● Einzelne Testanwendungen, aber noch keine Serienfahrzeuge mit EU-Zulassung verfügbar | ● Synth. Methan als Reinkraftstoff ist normkonform mit der DIN EN 16723-2 und damit 100 % drop-in-fähig | ● Nur 2 % _{vol} Wasserstoff in DIN EN 16723-2 erlaubt. Daher nicht drop-in-fähig. ● CNG-Fahrzeuge können für den Betrieb mit Hythan umgerüstet werden |
| Schadstoff-Emissionen aus der Fahrzeugnutzung | ● Überwiegend verringerte NOx-, CO-, Ruß- und HC-Emissionen im Vergleich zu konv. Benzin ● Kraftstoff verhält sich applikationsneutral | ● Verringerte CO-, Ruß- und HC-Emissionen im Vergleich zu konv. Benzin ● Wirkungsgradsteigerung möglich | ● Verringerte CO- und Ruß-Emissionen im Vergleich zu konv. Benzin ● Methanschlupf muss vermieden werden | ● C-haltige Emissionen im Vgl. zu CNG (syn. Methan) verringert |
| THG-Bilanz über den gesamten Lebensweg | ● THG-Bilanz etwas höher durch den erhöhten Aufwand für die Kraftstoffproduktion | ● Relativ geringe THG-Emissionen | ● Relativ geringe THG-Emissionen, allerdings hohe Unsicherheiten aufgrund von Methanschlupf | ● Relativ geringe THG-Emissionen, allerdings hohe Unsicherheiten aufgrund von Methanschlupf |
| F&E-Bedarfe | ● Erfüllung der Qualitätsanforderungen der DIN EN 228 ● Verwendung von FT-Benzin (und auch MtG) innerhalb der Bestandsflotte absichern ● Analyse des Einflusses unterschiedlicher Kraftstoffzusammensetzungen durch Additive und Oktanzahlbooster auf die Kaltstartfähigkeit sowie das Rußbildungspotenzial | ● Herausforderungen hinsichtlich der Motorlebensdauer aufgrund von Korrosion und Kavitation ● Entwicklung von Dual-Fuel-tauglichen Fahrzeugen welche mit Methanol oder Benzin gefahren werden können | ● Minimierung und Vermeidung des Methanschlupfes | ● Minimierung und Vermeidung des Methanschlupfes ● Entwicklung von Dual-Fuel-tauglichen Fahrzeugen welche mit Methan (CNG) und Hythan mit beliebigen H ₂ -Anteilen gefahren werden können |
| Begleitete EIV-Forschungsvorhaben | SolareKraftstoffe | MEEMO | MethQuest SynLink | |

* Die hier aufgeführten, generischen Kraftstoffpfade stellen eine Auswahl der von den begleiteten EIV-Forschungsvorhaben beforschten Kraftstoffarten dar. Daneben wurden noch verschiedene weitere Kraftstoffe betrachtet und in der BENiVer Roadmap beschrieben.

ROADMAP STRASSENVERKEHR

Die Ergebnisse der BEniVer-Szenarien haben gezeigt, dass E-Antriebe (batterieelektrisch bzw. Brennstoffzelle) in der Zukunft den Pkw- und Lkw-Sektor dominieren werden. Treiber hierfür sind unter anderem aktuelle Pläne zur Ausgestaltung zukünftiger CO₂-Flottengrenzwerte, die bei den Szenarien-Annahmen berücksichtigt wurden. Allerdings finden sich aufgrund der langen Verweildauer einzelner Fahrzeuge, trotz des berücksichtigten Verkaufsverbots von Verbrenner-Pkw, selbst im optimistischsten Szenario bei den derzeit geltenden politischen Rahmenbedingungen, **noch im Jahr 2045 Fahrzeuge mit verbrennungsmotorischem Antriebsstrang im Bestand**. Wenn es nicht gelingt, durch deutliche Anpassungen des regulatorischen Rahmens bis zum Jahr 2045 auf Kraftstoffe zu verzichten, müssten die verbleibenden fossilen Kraftstoffe vollständig durch defossilisierte Kraftstoffe ersetzt werden. Dafür wäre eine Deutschland- oder EU-weite Regelung zu Drop-In-Quoten von strombasierten und gegebenenfalls auch biogenen Kraftstoffen denkbar.

Um die Bestandsflotte zu defossilisieren, sollten **zukünftige synthetische Kraftstoffe normkonform mit aktuellen Kraftstoffnormen** sein, sodass sie auch in bestehenden Fahrzeugen getankt werden können. Hierfür relevante Kraftstoffnormen, welche bislang nicht in der BImSchV berücksichtigt sind, wie die Norm für paraffinischen Dieselmotorkraftstoff DIN EN 15940, sollten in diese integriert werden, sodass die entsprechenden Kraftstoffe auch in Deutschland in den Verkehr gebracht werden können. Weiterhin ist es notwendig, dass die Motoren bestehender und zukünftiger Fahrzeuge für die Nutzung dieser neuen Kraftstoffe (z.B. 100 % paraffinischer Diesel) durch die Hersteller freigegeben werden.

Allein der Benzin- und Diesel-Bedarf des Pkw- und Lkw-Verkehrs im klima-ambitioniertesten BEniVer-Szenario würde bei den geltenden regulatorischen Bedingungen das CO₂-Emissionsbudget des gesamten Straßenverkehrs von 85 Mio. Tonnen CO₂-Äquivalent im Jahr 2030⁶² voraussichtlich um 31 % übersteigen. Klimaneutrale, **strombasierte Kraftstoffe** könnten im Zuge einer übergeordneten Defossilisierungsstrategie und flankiert durch die Elektrifizierung der Fahrzeugflotte sowie weiteren Maßnahmen zur Verkehrsverlagerung und -vermeidung dabei helfen, die CO₂-Ziele des Verkehrssektors im Jahr 2030 zu erreichen.

Weiterhin bestehen vor allem in der **Landwirtschaft und bei Sonderfahrzeugen** für Nischenanwendungen* **Potenziale für strombasierte Kraftstoffe**. Dabei fällt der größte Bedarf auf die Landwirtschaft, wo vor allem im Bereich der schweren Maschinen mit hohem Leistungsbedarf und vielen Arbeitsstunden strombasierte Kraftstoffe Vorteile gegenüber direktelektrischen Lösungen aufweisen.

* Feuerwehr-, Rettungs- und Militärfahrzeuge, Katastrophenschutz, Baumaschinen, etc.

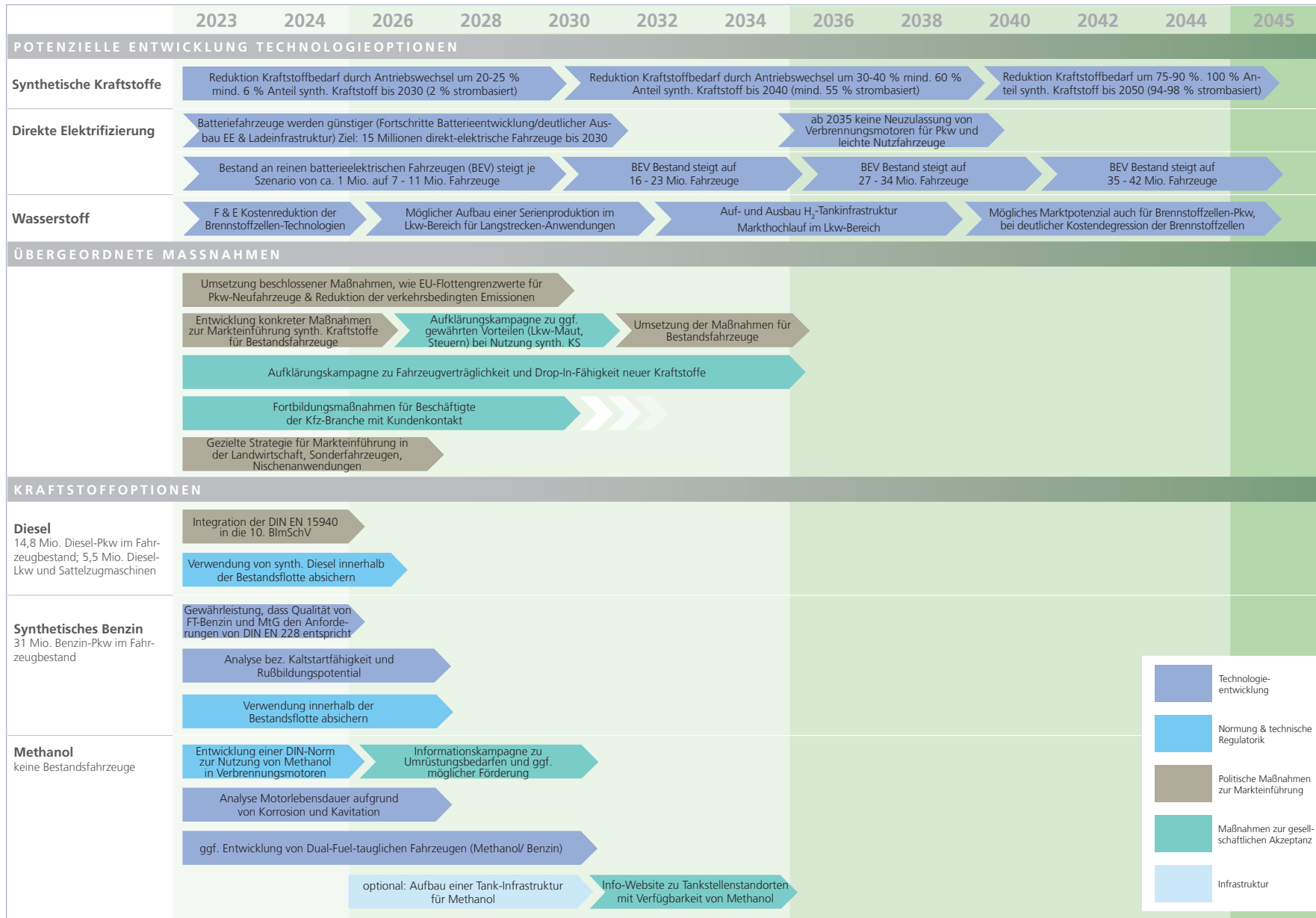


Abbildung 9: Roadmap im Straßenverkehr – Entwicklung Technologieoptionen und übergreifende Maßnahmen

6. FAZIT UND AUSBLICK

Synthetische Kraftstoffe können in den drei Verkehrsbereichen Luft-, Schifffahrt und Straßenverkehr jeweils unterschiedliches **Potenzial für die Defossilisierung der Mobilität** bieten. Der globale Luftverkehr sowie der überwiegende Anteil des Schiffsverkehrs können aus heutiger technischer Sicht bis 2045 nur durch synthetische Kraftstoffe defossilisiert werden. Im Straßenverkehr finden sich aufgrund der langen Nutzungsdauer einzelner Fahrzeuge auch im Jahr 2045 noch Bestandsfahrzeuge mit verbrennungsmotorischem Antriebsstrang im Bestand. Hierfür werden nicht-fossile Kraftstoff-Alternativen benötigt. Weiterhin bestehen vor allem in der Landwirtschaft und bei Sonderfahrzeugen für Nischenanwendungen* Potenziale für strombasierte Kraftstoffe. Dabei ist auf die effektive Wirkung zur Reduktion von Treibhausgasen zu achten, die **nur durch massiv steigende Anteile an erneuerbarem Strom im Strommix gewährleistet werden kann**.

Die Markteinführung strombasierter Kraftstoffe sollte in eine **übergeordnete Defossilisierungsstrategie** des Verkehrssektors eingebettet sein. Unter Beachtung von gesamtsystemischer Effizienz und Nachhaltigkeitskriterien sollte diese Strategie einen angemessenen **Mix aus Elektrifizierung und dem Einsatz synthetischer Kraftstoffe für den gesamten Verkehrssektor** schaffen. Darüber hinaus sollte sie eine intelligente Verzahnung mit **Maßnahmen zur Verkehrsverlagerung und -vermeidung** anstreben, um die Lücke zwischen dem Bedarf an Kraftstoffen und den verfügbaren Mengen weiter zu schließen.

Um den Bedarf strombasierter Kraftstoffe zu decken, reichen die politisch anvisierten Zielvorgaben der nationalen Quoten bislang nicht aus. Die Technologien zur Herstellung der Kraftstoffe sind generell vorhanden, allerdings muss die großtechnische, industrielle Umsetzung zeitnah und auf Basis von Nachhaltigkeitskriterien erfolgen. Für die Bereitstellung der erforderlichen erneuerbaren Energie ist ein massiver Ausbau der Kapazitäten erforderlich, wobei Deutschland zu großen Teilen auf den Import angewiesen sein wird, seine eigenen Potenziale aber dennoch nutzen sollte.

Falls die erforderlichen Mengen strombasierter Kraftstoffe nicht bereitgestellt werden können, sind **verstärkt Maßnahmen für eine umfassende Mobilitätswende** (z.B. Verkehrsverlagerung, Nachfragereduktion, etc.) erforderlich – somit könnte der Bedarf an mittelfristig knappen synthetischen Kraftstoffen im Verkehrsbereich reduziert, Ressourcen effizient genutzt, die Sektor-Ziele laut Bundesklimaschutzgesetz erreicht und Umweltauswirkungen minimiert werden.

Um gesellschaftlich gute Akzeptanzvoraussetzungen für den Einsatz strombasierter Kraftstoffe zu schaffen, sollte jeder wichtige Schritt zur Markteinführung durch Kommunikationsmaßnahmen vorbereitet bzw. von solchen begleitet werden. Ein wichtiges Ziel der Kommunikationsarbeit ist dabei der Abbau von Unsicherheiten bei den Akteuren.

* Feuerwehr-, Rettungs- und Militärfahrzeuge, Katastrophenschutz, Baumaschinen, etc.

ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS

| | |
|----------------------------|--|
| ASTM | International, American Society for Testing and Materials |
| AtJ-SPK | Alcohol-to-Jet Synthetic Paraffinic Kerosene |
| BEniVer | Begleitforschung für die Energiewende im Verkehr |
| BEV | Battery Electric Vehicle – Batterieelektrisches Fahrzeug |
| BImSchV | Bundesimmissionsschutzverordnung |
| BMBF | Bundesministerium für Bildung und Forschung |
| BMWK | Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz |
| C | Kohlenstoff |
| CEPS | Central European Pipeline System |
| CO₂ | Kohlenstoffdioxid |
| CO₂ä/kWh | CO ₂ -Äquivalent pro Kilowattstunde |
| CORSIA | Carbon Offsetting and Reduction Scheme for International Aviation |
| DAC | Direct Air Capture |
| DEL | Direkt Elektrisches Szenario im Rahmen von BEniVer |
| DMC | Dimethylcarbonat |
| DME | Dimethylenether |
| Dtld. | Deutschland |
| EE | Erneuerbare Energien |
| EiV | Energiewende im Verkehr |
| EU | Europäische Union |
| EU-ETS | European Union Emissions Trading System |
| F&E | Forschung & Entwicklung |
| FT | Fischer-Tropsch (Syntheseverfahren) |
| H₂ | Wasserstoff |
| HC | Hydrocarbons (Kohlenwasserstoffe) |
| HEFA | Hydrogenated Esters and Fatty Acids |
| IMO | International Maritime Organization |
| kt/a | Kilotonne pro Jahr |
| Lkw | Lastkraftwagen |
| LNG | Liquified Natural Gas |
| LOHC | Liquid-Organic Hydrogen Carrier (flüssige organische Wasserstoff Träger) |
| MeFo | Methylformiat |
| MEM | Markteinführungsmechanismen |
| MENA | Middle East, North Africa |
| Mio. | Millionen |
| MtG | Methanol-to-Gasoline |
| MtJ | Methanol-to-Jet |
| NPM | Nationale Plattform Zukunft der Mobilität (unabhängiges Expertengremium) |
| NWR | Nationaler Wasserstoffrat |
| OME | Oxymethylenether |
| ÖPNV | Öffentlicher Personen-Nahverkehr |
| Pkw | Personenkraftwagen |
| PtL | Power-to-Liquid |
| PtX | Power-to-X |
| PV | Photovoltaik |
| SAF | Sustainable Aviation Fuels |
| SDGs | Sustainable Development Goals der Vereinten Nationen (UN) |
| SO₂ | Schwefeldioxid-Emissionen |
| SNF | Schwere Nutzfahrzeuge |
| SO_x | Schwefeloxid |
| t/a | Tonnen pro Jahr |
| THG | Treibhausgase |
| THG100 | Szenario mit Reduktion der Treibhausgase um 100 % |
| UN | United Nations (Vereinte Nationen) |

QUELLEN & VERWEISE

- 1 BMUV, 18.08.2021, Bundes-Klimaschutzgesetz, <https://www.bmuv.de/gesetz/bundes-klimaschutz-gesetz>, zuletzt geprüft 26.04.2023
- 2 BMWK, 13.01.2022, Eröffnungsbilanz Klimaschutz, https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Downloads/Energie/220111_eroeffnungsbilanz_klimaschutz.pdf?, zuletzt geprüft 26.04.2023
- 3 Bundesnetzagentur, 04.01.2023, Bundesnetzagentur veröffentlicht Daten zum Strommarkt 2022, https://www.bundesnetzagentur.de/SharedDocs/Pressemitteilungen/DE/2023/20230104_smard.html, zuletzt geprüft 26.04.2023
- 4 BMWK, 13.01.2022, Eröffnungsbilanz Klimaschutz, https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Downloads/Energie/220111_eroeffnungsbilanz_klimaschutz.pdf?, zuletzt geprüft 26.04.2023
- 5 <https://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/erneuerbare-energien/erneuerbare-energien-in-zahlen#verkehr>
- 6 Umweltbundesamt, 31.01.2022, Kraftstoffverbrauch, <https://www.umweltbundesamt.de/daten/verkehr/kraftstoffe>, zuletzt geprüft 26.04.2023 und Umweltbundesamt, 14.09.2022, Spezifische Emissionen des Straßenverkehrs, <https://www.umweltbundesamt.de/daten/verkehr/emissionen-des-verkehrs#pkw-fahren-heute-klima-und-umweltvertraglicher>, zuletzt geprüft 26.04.2023
- 7 Forschungsstelle für Energiewirtschaft e.V., Ökobilanzen synthetischer Kraftstoffe, Methodikleitfaden, <https://www.ffe.de/projekte/beniver-begleitforschung-energiewende-im-verkehr/>
- 8 Eine Gegenüberstellung mit der notwendigen Menge an Strom für Elektromobilität kann aufgrund der Unterschiede in Bezug auf die Primärenergieeffizienz hier nicht erfolgen.
- 9 Die ausführliche Herleitung und zugrundeliegenden Annahmen werden in Kapitel 6 des Gesamtberichtes erläutert
- 10 Klimaneutrales Deutschland 2045 (Langfassung)
- 11 BDI Klimapfade 2.0 Ein Wirtschaftsprogramm für Klima und Zukunft Studie
- 12 Report: Deutschland auf dem Weg zur Klimaneutralität 2045 – Szenarien und Pfade im Modellvergleich
- 13 Wietschel et al. (2023), Eine kritische Diskussion der beschlossenen Maßnahmen zur E-Fuel-Förderung im Modernisierungspaket für Klimaschutz und Planungsbeschleunigung der Bundesregierung vom 28.3.2023
- 14 <https://www.langfristszenarien.de>
- 15 Die Bundesregierung. PtL-Roadmap: Nachhaltige strombasierte Kraftstoffe für den Luftverkehr in Deutschland. [Online] www.bmvi.de. 04 2021. [Zitat vom: 28. 10 2021.] https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Anlage/LF/ptl-roadmap.pdf?__blob=publicationFile, S.19
- 16 Europäische Kommission. Verkehr umweltverträglicher machen. 2021, S.3
- 17 C. Arndt, U. Neuling, T. Jänisch et al. Konzeptionelle und technische Ausgestaltung einer Entwicklungsplattform für Power-to-Liquid-Kraftstoffe. Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V., Technische Universität Hamburg, Griesemann Gruppe, 2021
- 18 K. Hauptmeier. Industrializing PtL for the renewable markets of tomorrow. https://www.dena.de/fileadmin/dena/Dokumente/Artikel/210615_Norsk-e-Fuel_Industrializing_PtL_for_the_renewable_markets_of_tomorrow.pdf, 21.04.2022.
- 19 Nordic Electrofuel AS. Production and Products. <https://nordicelectrofuel.no>, 12.04.2022.
- 20 Norsk e-fuel. Technological force and industrial-strength combined. <https://www.norsk-e-fuel.com/technology>, 21.04.2022
- 21 Haru Oni. Our sights are set on 2024 - and 1 m tons. <https://www.haruoni.com/#/en>, 21.04.2022.
- 22 Nationaler Wasserstoffrat. Wasserstoff Aktionsplan Deutschland 2021-2025. www.wasserstoffrat.de, 28. 10 2021

- 23 Nationale Plattform Zukunft der Mobilität (NPM). Roadmap- Markthochläufe alternativer Antriebe und Kraftstoffe aus technologischer Perspektive. https://www.plattform-zukunft-mobilitaet.de/wp-content/uploads/2021/04/NPM_AG2_Technologie_Roadmap.pdf, 17.03.2022
- 24 Im Bereich der Energiewende hat das BMWK bereits Beziehungen zu mehr als 20 Partnerländern aufgebaut (Jahresbericht, <https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Artikel/Energie/internationale-energiepolitik-2.html>)
- 25 Grüner Wasserstoff: Welche internationalen Projekte fördert das BMBF?, 16.02.2023, <https://www.bmbf.de/bmbf/shareddocs/kurzmeldungen/de/woher-soll-der-gruene-wasserstoff-kommen.html>, zuletzt geprüft 24.04.2023
- 26 Vgl. zum Entstehungsprozess und zur Darstellung der SDGs <https://sdgs.un.org/goals>, letzter Abruf am 06.11.2022.
- 27 In der quantitativen Datenanalyse gilt ein Schätzwert als robust, „wenn er durch Abweichungen von Verteilungsannahmen oder durch Ausreißer – d. h. einzelne Extremwerte innerhalb der Stichprobe – wenig beeinflusst wird.“ (Döring 2022, 624)
[Forschungsmethoden und Evaluation in den Sozial- und Humanwissenschaften, 6. Auflage, Springer Verlag, Berlin]
- 28 Dieser Begriff wird in Anlehnung an den von der IRENA genutzten Begriff der „Renewables’ Readiness“ verwendet, welche als „key conditions for renewable energy technology development and deployment in a country“ definiert wird. (Vgl. IRENA (Hg.): Renewables Readiness Assessment. Design to Action. Online verfügbar unter https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2013/RRA_Design_to_Action.pdf?rev=04c75bcec4874a6096bacf3c66c3ff59)
- 29 Vgl. Kap. 9.2 der Langfassung und darin Abb. 9-4.
- 30 vgl. exemplaracatech/Leopoldina/Akademienunion (Hrsg.): Wie wird Deutschland klimaneutral? Handlungsoptionen für Technologieumbau, Verbrauchsreduktion und Kohlenstoffmanagement (Schriftenreihe zur wissenschaftsbasierten Politikberatung), 2023. ISBN: 978-3-8047-4423-3, S. 76
- 31 Europäisches Parlament, Pressemitteilung: „Fit for 55: Parliament and Council reach deal on greener aviation fuels“ 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> (Zugriff am 03.05.2023)
- 32 Sustainable Aviation Fuel. A proven alternative fuel for immediate CO₂ reduction. Airbus. Online verfügbar unter <https://www.airbus.com/en/sustainability/respecting-the-planet/decarbonisation/sustainable-aviation-fuel>, zuletzt geprüft am 10.06.2022
- 33 Fuel Qualification. Commercial Aviation Alternative Fuels Initiative (CAAFI). Online verfügbar unter https://www.caafi.org/focus_areas/fuel_qualification.html#approved, zuletzt aktualisiert am 08.09.2022, zuletzt geprüft am 10.12.2022
- 34 ASTM D7566-20c: Specification for Aviation Turbine Fuel Containing Synthesized Hydrocarbons
- 35 NESTE, Pressemitteilung: „Brussels Airlines starts new year with a first delivery of Neste MY Sustainable Aviation Fuel to Brussels Airport via CEPS pipeline“, 01.01.2023, <https://www.neste.com/releases-and-news/renewable-solutions/brussels-airlines-starts-new-year-first-delivery-neste-my-sustainable-aviation-fuel-brussels-airport>, zuletzt aufgerufen am 15.03.2023
- 36 Brussels Airlines: „Brussels Airlines and Brussels Airport kick off the new year with first delivery of Sustainable Aviation Fuel via NATO pipeline“, 01.01.2023, <https://press.brusselsairlines.com/brussels-airlines-and-brussels-airport-kick-off-the-new-year-with-first-delivery-of-sustainable-aviation-fuel-via-nato-pipeline#>, zuletzt aufgerufen am 15.03.2023
- 37 aireg: „A Book and Claim Approach for SAF“, https://aireg.de/wp-content/uploads/2022/08/bc-papier_v01-5.pdf, zuletzt aufgerufen am 15.03.2023
- 38 Mission Possible Partnership: „MAKING NET-ZERO AVIATION POSSIBLE“, Juli 2022, <https://missionpossiblepartnership.org/wp-content/uploads/2023/01/Making-Net-Zero-Aviation-possible.pdf>, zuletzt aufgerufen am 15.03.2023

- 39 Siehe „Zero Emission Aviation – Emissionsfreie Luftfahrt“, DLR 2020, https://www.dlr.de/content/de/downloads/2020/white-paper-zero-emission-aviation.pdf?__blob=publicationFile&v=6
- 40 Fourth Greenhouse Gas Study 2020. Hg. v. International Maritime Organization (IMO). Online verfügbar unter <https://www.imo.org/en/OurWork/Environment/Pages/Fourth-IMO-Greenhouse-Gas-Study-2020.aspx>, zuletzt geprüft am 10.12.2022
- 41 Europäische Kommission: Vorschlag für eine VERORDNUNG DES EUROPÄISCHEN PARLAMENTS UND DES RATES über die Nutzung erneuerbarer und kohlenstoffarmer Kraftstoffe im Seeverkehr und zur Änderung der Richtlinie 2009/16/EG, <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/?uri=CELEX%3A52021PC0562> (Zugriff am 01.06.2022)
- 42 Strombasierte Kraftstoffe für die Anwendung in der Rückverstromung, 19.10.2022. Persönliche Kommunikation (M. Auer als Vertretung für E2Fuels)
- 43 Shipping giant Maersk to become major green hydrogen consumer as it embraces methanol fuel. Hg. v. Recharge. Online verfügbar unter <https://www.rechargenews.com/energy-transition/shipping-giant-maersk-to-become-major-green-hydrogen-consumer-as-it-embraces-methanol-fuel/2-1-1143147>, zuletzt aktualisiert am 10.12.2022, zuletzt geprüft am 10.12.2022
- 44 Maersk ordert Schiffe mit Methanolantrieb. Norddeutscher Rundfunk. tagesschau.de. Online verfügbar <https://www.tagesschau.de/wirtschaft/unternehmen/maersk-gruener-antrieb-101.html> (zuletzt aufgerufen am 15.03.2023)
- 45 Offshore Energy: Suiso Frontier brings world's 1st LH2 shipment to Japan, <https://www.offshore-energy.biz/suiso-frontier-brings-worlds-1st-lh2-shipment-to-japan/> (zuletzt aufgerufen am 09.02.2023)
- 46 Für Details sei an dieser Stelle auf das Kapitel 10.3.4 des Hauptdokumentes, der BEniVer-Roadmap verwiesen.
- 47 ShipFC-Projekt: Hochtemperatur-Brennstoffzelle mit Ammoniak für Schiffe, <https://www.internationales-verkehrswesen.de/shipfc-projekt-hochtemperatur-brennstoffzelle-mit-ammoniak-fuer-schiffe/> (zuletzt aufgerufen am 19.05.2022)
- 48 Viridis Bulk Carriers, <https://www.viridisbulkcarriers.no/fleet-technology> (zuletzt aufgerufen am 19.05.2022)
- 49 Wärtsilä: Partners join forces to speed up ammonia engine development, <https://www.offshore-energy.biz/wartsila-partners-join-forces-to-speed-up-ammonia-engine-development> (zuletzt aufgerufen am 19.05.2022)
- 50 Umweltbundesamt (Hg.) (2022b): Daten der Treibhausgasemissionen des Jahres 2021 nach KSG. Online verfügbar unter <https://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/treibhausgasemissionen>, zuletzt geprüft am 03.06.2022.
- 51 Umweltbundesamt (Hg.) (2022a): Berechnung der Treibhausgasemissionsdaten für das Jahr 2021 gemäß Bundesklimaschutzgesetz. Be-gleitender Bericht. Online verfügbar unter https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/361/dokumente/220310_vjs_2021_-_begleitender_bericht_-_sauber_vbs_korr_kurzfassung.pdf, zuletzt geprüft am 03.06.2022.
- 52 Kraftfahrt-Bundesamt (Hg.) (2022c): Jahresbilanz - Der Fahrzeugbestand im Überblick am 1. Januar 2022 gegenüber 1. Januar 2021. Online verfügbar unter https://www.kba.de/DE/Statistik/Fahrzeuge/Bestand/Jahresbilanz_Bestand/2022/2022_b_ueberblick_pdf.html
- 53 Amtsblatt der Europäischen Union (2019) VERORDNUNG (EU) 2019/631 DES EUROPÄISCHEN PARLAMENTS UND DES RATES vom 17. April 2019 zur Festsetzung von CO₂-Emissionsnormen für neue Personenkraftwagen und für neue leichte Nutzfahrzeuge und zur Aufhebung der Verordnungen (EG) Nr. 443/2009 und (EU) Nr. 510/2011

- 54 Amtsblatt der Europäischen Union (2019) Verordnung (EU) 2019/1242 des europäischen Parlaments und des Rates vom 20. Juni 2019 zur Festlegung von CO₂-Emissionsnormen für neue schwere Nutzfahrzeuge und zur Änderung der Verordnungen (EG) Nr. 595/2009 und (EU) 2018/956 des Europäischen Parlaments und des Rates sowie der Richtlinie 96/53/EG des Rates (Text von Bedeutung für den EWR)
- 55 Europäische Kommission (2021) Vorschlag für eine VERORDNUNG DES EUROPÄISCHEN PARLAMENTS UND DES RATES zur Änderung der Verordnung (EU) 2019/631 im Hinblick auf eine Verschärfung der CO₂-Emissionsnormen für neue Personenkraftwagen und für neue leichte Nutzfahrzeuge im Einklang mit den ehrgeizigeren Klimazielen der Union.
- 56 Rat der EU (2023). „Fit für 55“: Rat nimmt Verordnung über CO₂-Emissionen für neue Personenkraftwagen und leichte Nutzfahrzeuge an. Online verfügbar unter: <https://www.consilium.europa.eu/de/press/press-releases/2023/03/28/fit-for-55-council-adopts-regulation-on-co2-emissions-for-new-cars-and-vans/>, zuletzt abgerufen am 27.04.2023
- 57 Europäische Kommission, 2022, https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/de/ip_22_6495
- 58 NormAKraft: Fact Sheets zur Normkonformität und Materialverträglichkeit alternativer Kraftstoffe. ** in Vorbereitung **. Hg. v. DE-CHEMA, Gesellschaft für Chemische Technik und Biotechnologie e.V. Frankfurt am Main
- 59 Deutscher Bundestag, Drucksache 20/5830, Beschlussempfehlung und Bericht des Ausschusses für Wohnen, Stadtentwicklung, Bauwesen und Kommunen (24. Ausschuss), 01.03.2023, <https://dserver.bundestag.de/btd/20/058/2005830.pdf>
- 60 Zusammensetzung: 7 %Vol Biodiesel, 26 %Vol HVO, 67 %Vol fossiler Dieselkraftstoff (siehe: AVIA R33 – Diesel, Shell R33 Blue Diesel)
- 61 <https://www.edi-hohenlohe.de/produkte/kraftstoffe/synthetischer-diesel/freigaben/>
- 62 Klimaschutz in Zahlen. Fakten, Trends und Impulse deutscher Klimapolitik. Hg. v. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz (BMUV) (Broschüre Nr. 10059).
- 63 Nationaler Wasserstoffrat, Einordnung verschiedener Pfade der Herstellung von Wasserstoff („Farbenlehre“), 1.4.22

EIV PARTNER & ASSOZIIERTE PARTNER*

HOCHSCHULEN

- Fachhochschule Aachen
- Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg (FAU)
- Hochschule Darmstadt – University of Applied Sciences
- Hochschule Karlsruhe (HKA)
- Ostbayerische Technische Hochschule Regensburg (OTH)
- Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen University (RWTH)
- Rheinland-Pfälzische TU Kaiserslautern-Landau (RPTU)
- Ruhr Universität Bochum (RUB)
- Technische Universität Bergakademie Freiberg
- Technische Universität Berlin
- Technische Universität Darmstadt
- Technische Universität Dresden
- Technische Universität Hamburg (TUHH)
- Technische Universität München (TUM)
- Universität Bayreuth
- Universität Bremen
- Universität Rostock
- Universität Stuttgart



INSTITUTE UND FORSCHUNGSEINRICHTUNGEN

- Clausthaler Umwelttechnik Forschungszentrum (CUTEC)
- Deutsches Biomasseforschungszentrum gGmbH (DBFZ)
- DBI Gastechnologisches Institut gGmbH Freiberg (DBI)
- DBI Gas- und Umwelttechnik GmbH
- DECHEMA Gesellschaft für Chemische Technik und Biotechnologie e.V.
- Deutsches Forschungszentrum für Künstliche Intelligenz GmbH (DFKI)
- Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR)
- DVGW-Forschungsstelle am Engler-Bunte-Institut des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT)
- Europäisches Institut für Energieforschung (EiFER)
- FfE Forschungsstelle für Energiewirtschaft e.V.
- Forschungsinstitut für Kraftfahrwesen und Fahrzeugmotoren Stuttgart (FKFS)
- Forschungszentrum für Verbrennungsmotoren und Thermodynamik Rostock GmbH
- Forschungszentrum Jülich GmbH
- Fraunhofer Institute
- GWS Gesellschaft für wirtschaftliche Strukturforchung GmbH
- Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung GmbH
- Institut für Energie und Kreislaufwirtschaft an der Hochschule Bremen GmbH
- Institut für Klimaschutz, Energie und Mobilität e.V. (IKEM)
- Institut für Luft- und Kältetechnik gGmbH



- Institut für ZukunftsEnergie- und Stoffstromsysteme (IZES gGmbH)
- Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
- MOT Forschungs- und Entwicklungsgesellschaft für Motorentechnik, Optik und Thermodynamik
- Oel-Wärme-Institut gGmbH (OWI)
- OWI Science for Fuels gGmbH
- Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie gGmbH
- Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung Baden-Württemberg (ZSW)



INDUSTRIE

- Airbus Defence and Space GmbH
- ARCUS Technologie GmbH & Co. GTL Projekt KG
- ASG Analytik Service AG
- ASTRA Industrieanlagen GmbH
- AUDI AG
- AVL Deutschland GmbH
- AVL qpunkt GmbH
- AVL Software & Functions GmbH
- BASF SE
- BMW Group
- BMW Motoren GmbH
- BP Europa SE
- bse Engineering Leipzig GmbH
- Chemieanlagenbau Chemnitz GmbH
- Clariant Produkte (Deutschland) GmbH
- Climeworks AG / Climeworks Deutschland GmbH
- Continental Automotive GmbH
- Daimler AG
- DENSO AUTOMOTIVE Deutschland GmbH
- Deutz AG
- Dichtungstechnik Wallstabe & Schneider GmbH & Co. KG
- EDL Anlagenbau Gesellschaft mbH
- Elogen GmbH
- ERC Additiv GmbH
- Evonik Technology & Infrastructure GmbH
- Federal-Mogul Burscheid GmbH / TENNECO
- FEV Europe GmbH
- Ford-Werke GmbH
- FVTR GmbH
- Graforce GmbH
- Grillo Werke AG
- Hyundai Motor Europe Technical Center GmbH
- IAVF Antriebstechnik GmbH
- iGas energy GmbH
- INERATEC GmbH
- Infracore GmbH & Co. Höchst KG
- INPUT Ingenieure GmbH
- Isuzu MOTORS Germany GmbH
- Kelvion Machine Cooling Systems GmbH



- KTM Forschungs- und Entwicklungs GmbH
- Liebherr-Components Deggendorf GmbH
- Linde AG
- MAN Energy Solutions SE
- MAN Truck & Bus SE
- MANN+HUMMEL GmbH
- MCT Transformatoren GmbH
- Mitsubishi Power Europe GmbH
- Motorenfabrik Hatz GmbH & Co. KG
- MTU Friedrichshafen GmbH
- Opel Automobile GmbH
- Primagas Energie GmbH
- Raffinerie Heide GmbH
- Robert Bosch GmbH
- Rolls-Royce Solutions GmbH
- RWE Power AG
- Schaeffler Technologies AG & Co. KG
- Sensor-Technik Wiedemann GmbH
- Shell Global Solutions (Deutschland) GmbH
- Siemens AG
- SunFire GmbH
- TEC4FUELS GmbH
- Total Research & Technology Feluy
- Umicore AG & Co. KG
- Volkswagen AG
- Wallstabe und Schneider GmbH & Co. KG
- WEISSGERBER engineering GmbH
- WJ Power GmbH
- Woodward L'Orange GmbH



SONSTIGE

- Aviation Fuel Projects Consulting (AFPC)
- Bauhaus Luftfahrt e.V.
- bremenports GmbH & Co. KG
- DGMK Deutsche Wissenschaftliche Gesellschaft für Erdöl, Erdgas und Kohle e.V.
- Energy Systems Analysis Associates – ESA² GmbH
- Erdgas Südwest GmbH
- GMA Gesellschaft für Mineralöl-Analytik und Qualitätsmanagement mbH + Co. KG
- Innogy SE
- Keep it green GmbH
- Kraftanlagen München GmbH
- Open Grid Europe GmbH
- Overspeed GmbH & Co. KG
- Stadtwerk Haßfurt GmbH
- Stadtwerke Karlsruhe GmbH
- terranets bw GmbH
- WISTA Management GmbH

bremenports
:

overspeed
GmbH & Co. KG

* Die Abbildung des Logos erfolgte nur bei vorliegender Freigabe.