

# Roadmap für strombasierte Kraftstoffe

Gesamtbericht zur Begleitforschung Energiewende im Verkehr (BEniVer)

November 2023



## BEniVer

Begleitforschung Energiewende im Verkehr



Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

Dieser Bericht ist Teil der „Forschungsinitiative Energiewende im Verkehr: Sektorkopplung durch die Nutzung strombasierter Kraftstoffe“ (EiV). 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)

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 Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autorinnen und Autoren.

## Impressum

**Herausgeber:** Verbundvorhaben BEniVer, Begleitforschung EiV

**Anschrift:** Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR)  
Pfaffenwaldring 38-40  
70569 Stuttgart  
E-Mail: [beniver@dlr.de](mailto:beniver@dlr.de)

**Stand:** November 2023

**Gefördert durch** BMWK

**Begleitforschung** betreut durch den Projektträger Jülich

**Forschungsinitiative** betreut durch Projektträger Jülich und TÜV Rheinland Consulting

**DOI** 10.5281/zenodo.10208039

## 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 Zukunftenergie- 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 Strukturforschung 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 Zukunftenergie- 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 Esmaeli 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 Zukunftenergie- 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 Zukunftenergie- 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 Zukunftenergie- 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 forschte 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 (bodengebundener 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 forschte 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.**

## Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Herausforderungen für die Energiewende im Verkehr .....</b>	<b>10</b>
1.1	Forschungsinitiative Energiewende im Verkehr: Sektorkopplung durch die Nutzung strombasierter Kraftstoffe.....	10
1.2	Begleitforschung BEniVer.....	12
1.3	Struktur der Zusammenarbeit.....	13
1.4	Vorstellung der Verbundvorhaben.....	14
<b>2</b>	<b>Methodik: Kraftstoffpfade und Rahmenannahmen .....</b>	<b>20</b>
2.1	Definition Kraftstoffpfad .....	20
2.2	Rahmenannahmen.....	21
2.3	Ziel und Methodik der Ökobilanz .....	28
2.4	Ziel und Methodik der techno-ökonomischen Analyse (TÖA) .....	30
2.5	Referenzpfade.....	31
2.6	Spezifische Kraftstoffpfade der EiV-Verbundvorhaben .....	33
2.7	Analyse der Kraftstoffe, Normkonformität und Materialverträglichkeit.....	36
<b>3</b>	<b>Kriterien für die ganzheitliche Bewertung der Kraftstoffpfade .....</b>	<b>50</b>
3.1	Integration in das Energiesystem .....	55
3.2	Techno-ökonomische Bewertung der Herstellung .....	57
3.3	Kraftstoffnutzung .....	59
3.4	Integration ins Verkehrssystem: Straße.....	69
3.5	Ökologische Bewertung .....	71
3.6	Akzeptanz .....	74
3.7	Markteinführung .....	76



<b>4</b>	<b>Bewertung der generischen Referenzpfade für synthetische Kraftstoffe .....</b>	<b>89</b>
4.1	Integration ins Energiesystem .....	92
4.2	Techno-ökonomische Bewertung der Herstellung .....	92
4.3	Kraftstoffnutzung .....	101
4.4	Integration ins Verkehrssystem: Straße.....	117
4.5	Ökologische Bewertung .....	128
4.6	Akzeptanz .....	145
4.7	Markteinführung .....	149
<b>5</b>	<b>Vergleich der spezifischen Kraftstoffpfade der EiV-Verbundvorhaben .....</b>	<b>165</b>
5.1	Integration ins Energiesystem .....	168
5.2	Techno-ökonomische Bewertung der Herstellung .....	168
5.3	Kraftstoffnutzung .....	174
5.4	Integration ins Verkehrssystem: Straße.....	190
5.5	Ökologische Bewertung .....	196
5.6	Akzeptanz .....	207
5.7	Markteinführung .....	211
<b>6</b>	<b>Szenarien zur Einordnung in den gesamtsystemischen Kontext.....</b>	<b>228</b>
6.1	Beschreibung der Rahmen-Szenarien und Storylines .....	228
6.2	Übersicht der Modelle .....	228
6.3	Verkehrsbereichsübergreifende Annahmen .....	229
6.4	Straßenverkehr .....	231
6.5	Landwirtschaft und Sonderfahrzeuge .....	246
6.6	Luftfahrt.....	250

6.7	Zukünftiger Endenergie- und Kraftstoffbedarf in Deutschland.....	252
6.8	Gesamtsystem der Energiebereitstellung .....	260
6.9	Industrieökonomische und gesamtwirtschaftliche Auswirkung.....	281
<b>7</b>	<b>Internationale Betrachtungen .....</b>	<b>293</b>
7.1	Internationales Technologie-Monitoring synth. Kraftstoffe .....	293
7.2	Techno-ökonomische und ökologische Bewertung generischer Kraftstoffpfade bei Herstellung im Ausland .....	325
7.3	Verbundvorhaben MENA-Fuels zur Bewertung der Rolle der MENA-Region für die Versorgung von Deutschland mit grünem Wasserstoff und seinen Folgeprodukten.....	329
<b>8</b>	<b>Akzeptanz .....</b>	<b>331</b>
8.1	Akteursanalyse.....	332
8.2	Medienanalyse .....	333
8.3	Akzeptanzfaktoren und Nutzerpräferenzen .....	338
<b>9</b>	<b>Strategien und regulatorische Rahmenbedingungen für die Markteinführung.....</b>	<b>358</b>
9.1	Methodische Einordnung zur Konzeption von Markteinführungsmechanismen ....	359
9.2	Überblick über bestehende Kraftstoffmärkte.....	369
9.3	Entwicklung einer Ländertypologie als Basis importbezogener Markteinführungsmechanismen .....	386
9.4	Regulatorische Rahmenbedingungen im Verkehrssektor und Konsequenzen für die Einführung synthetischer Kraftstoffe.....	396
9.5	Fazit: Resultierende energie- und gesamtsystemische Konsequenzen für die Markteinführung.....	405
<b>10</b>	<b>Schlussfolgerungen und Handlungsoptionen.....</b>	<b>417</b>
10.1	Herstelltechnologien.....	417
10.2	Luftfahrt.....	432

---

10.3	Schifffahrt.....	446
10.4	Straßenverkehr .....	462
<b>11</b>	<b>Anhang.....</b>	<b>482</b>
11.1	Abkürzungsverzeichnis .....	482
11.2	Abbildungsverzeichnis.....	489
11.3	Tabellenverzeichnis.....	499
11.4	Literaturverzeichnis .....	507

# 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 vorgezogen [KSG 2021]. Diese Zielerreichung stellt eine enorme Herausforderung dar, zu der alle Sektoren einen anspruchsvollen Beitrag leisten müssen [BMWK 2022b].

Im Stromsektor wurde im Jahr 2022 bereits ein Anteil von 48,3 % Strom aus erneuerbaren Energien erreicht [BNetzA 2023]. 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“ [BMWK 2022b].

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 % [UBA 2023]. Die Reduktion von CO<sub>2</sub> ist hier bislang hauptsächlich auf die Nutzung biogener Kraftstoffe in der Luft- und Schifffahrt und im Straßenverkehr zurückzuführen. Die durch Effizienzgewinne erzielten CO<sub>2</sub>-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 [UBA 2022e, 2022f]. Das verdeutlicht, dass die bisherigen Maßnahmen bei weitem nicht ausreichen, um die Klimaziele im Verkehr zu erreichen.

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. 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.

## 1.1 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 (BMWK) zwischen 2018 und 2023 über 86 Mio. Euro Fördermittel bereitgestellt. Die 16 Projektverbände mit über 100 beteiligten Partnern aus Industrie und Forschung (siehe Abbildung 1-2) 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 strombasierter Kraftstoffe kann besonders vor dem Hintergrund aktueller welt-politischer Entwicklungen Handlungsoptionen aufzeigen, um den bestehenden Herausforde-rungen zu begegnen. Die Substitution von rohölbasierten Kraftstoffen durch synthetische Al-ternativen 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 Versor-gungsstrukturen 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	Forschungs-bereiche	Untersuchte Kraftstoffe	Fokussierte Verkehrsbereiche
BEniVer		Kraftstoffe der Forschungsinitiative	
C <sup>3</sup> -Mobility		Synth. Benzin, DME, OME <sub>3,5</sub> , Methanol, Butanol, Oktanol	
CombiFuel		Hythan	
E2Fuels		Methanol, OME <sub>3,5</sub> , Methan, Hythan	
FlexDME		Dimethylether (DME)	
ISystem4EFuel		Synth. Diesel, Oxymethylenether (OME <sub>3,5</sub> )	
KEROSyN100		Synth. Kerosin	
LeanStoicH <sub>2</sub>		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 <sub>3,5</sub> , Dimethylcarbonat (DMC), Methylformiat (MeFo)	

- Straßenverkehr
- Luftverkehr
- Schiffsverkehr
- Rückverstromung
- Kraftstoffherstellung
- Kraftstoffnutzung, Anwendungen
- Systemanalyse

**Abbildung 1-1:** Forschungsbereiche und fokussierte Verkehrsbereiche der EiV-Verbünde

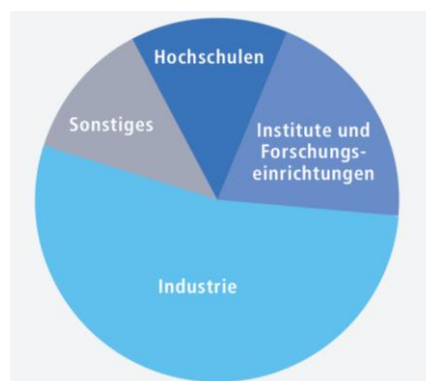
Fokus bei allen Verbundvorhaben war die Herstellung oder Nutzung innovativer, synthetischer Kraftstoffe. Dazu gehören unter anderem Methanol, Ethanol, Oxymethylenether-Kraftstoff (OME), Sustainable Aviation Fuels (SAF), synthetisch hergestelltes Erdgas und Biogas mit Wasserstoffanteilen. Einige dieser synthetischen Kraftstoffe können direkt dem Kraftstoff in heutigen Pkw, Lkw, Flugzeugen oder Schiffen beigemischt werden. Andere erfordern eine Anpassung der Motorentechnologie.

## 1.2 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 Methodikleitfäden [Pichlmaier et al. 2021] im Rahmen von drei Statuskonferenzen und zahlreichen fachspezifischen Workshops entwickelt.

Die Ergebnisse der Forschungsprojekte wurden in einer Gesamtbetrachtung zusammengeführt und dienen 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.

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.

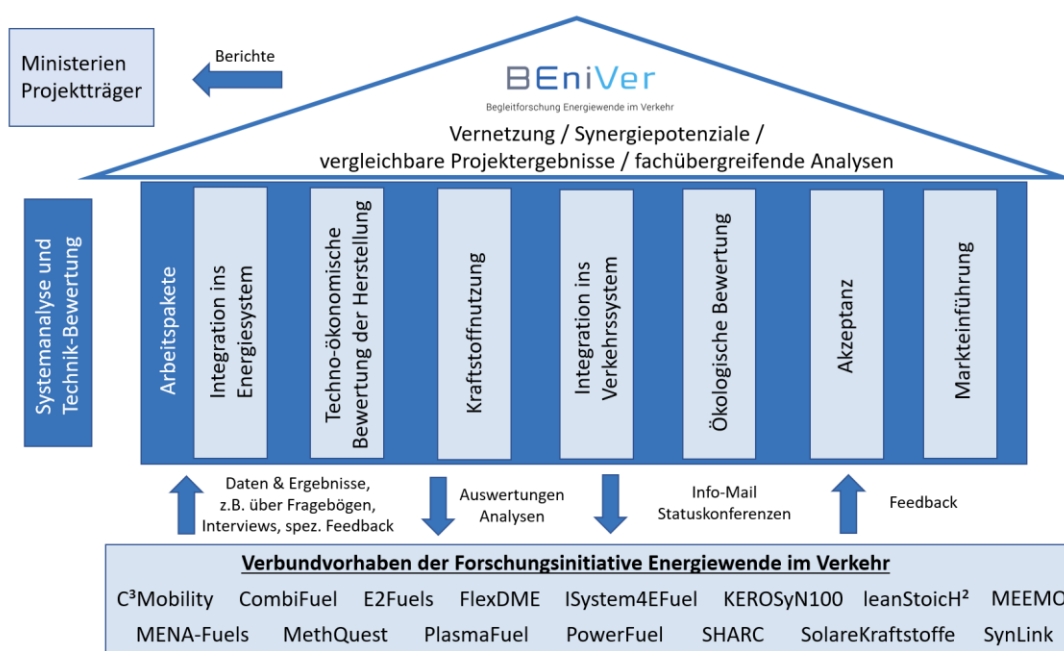


**Abbildung 1-2:** Über 100 Partner aus Industrie, Hochschulen und Forschungseinrichtungen waren in der Forschungsinitiative EiV beteiligt

## 1.3 Struktur der Zusammenarbeit

Zu Beginn des Projektes wurde ein Konzept zur Zusammenarbeit innerhalb der Forschungsinitiative erstellt. Dieses dient einerseits der Transparenz und Nachvollziehbarkeit von Bewertungen und Analysen der Begleitforschung und zum anderen dazu, die Vertraulichkeit von Daten und Informationen zu gewährleisten. Das Konzept wurde mit den Verbundvorhaben der Forschungsinitiative diskutiert und abgestimmt.

Um die Vergleichbarkeit von Analysen zu ermöglichen, erfolgte eine projektübergreifende Abstimmung wissenschaftlicher Methoden und Rahmenannahmen mit den Forschungsverbänden sowie die Einordnung verbundspezifischer Ergebnisse im Vergleich zu anderen Verbundvorhaben.



**Abbildung 1-3:** Struktur der Zusammenarbeit in der Begleitforschung EIV

Um relevante Informationen bereitzustellen, Möglichkeiten für den wissenschaftlichen Austausch einzurichten und Synergieeffekte nutzen zu können, wurden jährliche Statuskonferenzen und fachübergreifende Workshops organisiert, ein regelmäßiger Newsletter versendet sowie der kontinuierliche Kontakt zu allen Forschungsverbänden gepflegt.

Die wissenschaftlichen Analysen und technischen Bewertungen wurden in sieben Arbeitspakete geclustert. Neben den Bereichen der Herstellung, Nutzung, ökologischen Bewertung und der Integration strombasierter Kraftstoffe ins Energie- und Verkehrssystem wurden auch die Forschungsfelder der gesellschaftlichen Akzeptanz und potenzieller Markteinführungsmechanismen betrachtet.

## 1.4 Vorstellung der Verbundvorhaben

Die Forschungsschwerpunkte der einzelnen Verbundvorhaben werden nachfolgend in alphabetischer Reihenfolge aufgezeigt.

### **C3-Mobility**

#### **Closed Carbon Cycle Mobility: Klimaneutrale Kraftstoffe für den Verkehr der Zukunft**

Im Verbundprojekt C3-Mobility hat ein sektorübergreifendes Konsortium aus 32 Partnern aus der Energieversorgung, der verfahrenstechnischen Industrie, der Automobil- bzw. Industriemotorindustrie sowie der Forschung und Entwicklung neue Wege in die CO<sub>2</sub>-neutrale Mobilität der Zukunft erarbeitet.

Im Fokus des Projektes standen Kraftstoffe basierend auf Methanol. Neben der direkten Nutzung als Kraftstoff wurde auch die (lokale) Weiterverarbeitung zu anderen Kraftstoffen untersucht. Dabei wurde die gesamte Wertschöpfungskette von der Kraftstoffsynthese über die motorische Anwendung bis zur Markteinführung bewertet.

[www.c3-mobility.de](http://www.c3-mobility.de)

### **CombiFuel**

#### **Synthetisches Methan und Wasserstoff aus Schmutzwasser als Kraftstoff für Verbrennungsmotoren**

Auf dem Gelände der Berliner Wasserbetriebe im Klärwerk Waßmannsdorf betreibt das Technologieunternehmen Graforce eine Power2Gas-Anlage im Rahmen des CombiFuel-Projekts. Ziel ist die Erzeugung von grünem Wasserstoff aus Zentratwasser der Klärschlammabwasserreinigung.

Dafür hat Graforce ein Verfahren zur plasmabasierten Wasserelektrolyse (die so genannte Plasmalyse) entwickelt. Der erzeugte grüne Wasserstoff wird in verschiedenen Beimischungen (bis 40 % Vol H<sub>2</sub>) in Fahrzeugen mit Gasantriebstechnik genutzt. Das Motoren- und Abgasverhalten wurde an verschiedenen Erdgasfahrzeugen getestet. Die Plasmalyse bietet zudem Kosten- und Verfahrensvorteile bei der Behandlung besonders ammoniumhaltiger Prozesswässer (3.000 L/h) aus der Abwasserreinigung. Bisher müssen die enthaltenen Schadstoffe wie Ammonium in einem aufwendigen Reinigungsprozess abgebaut werden.

[www.energiesystem-forschung.de/forschen/projekte/combifuel](http://www.energiesystem-forschung.de/forschen/projekte/combifuel)

### **E2Fuels**

#### **Erneuerbare Emissionsarme Kraftstoffe: Forschung zur Herstellung und Nutzung in einem sektorgekoppeltem Ansatz**

Das Projekt E2Fuels hat die Entwicklung der strombasierten Kraftstoffe Wasserstoff, Methan, Methanol und OME untersucht. Es wurde die Produktion der Kraftstoffe sowie die Nutzung in mobilen Anwendungen, der Industrie sowie in maritimen Systemen untersucht. Somit trägt das



Projekt dazu bei, dass zukünftige synthetische Energieträger in allen Lebensphasen intelligent und effizient eingebunden werden.

[Projekt E2Fuels - energiesystem-forschung.de](http://energiesystem-forschung.de)

### **FlexDME**

#### **Flexible Dimethylethersynthese aus regenerativen Rohstoffen zur nachhaltigen Kraftstoffgewinnung**

Das Projekt FlexDME hat die Entwicklung einer flexibel operierenden Demonstrationsanlage zur Herstellung des Kraftstoffes Dimethylether (DME,  $\text{CH}_3\text{OCH}_3$ ) aus Rohbiogas und erneuerbarem Strom untersucht. Aufgrund der hohen Speicherdichte und hervorragender Verbrennungseigenschaften (hohe Cetanzahl, rußfreie Verbrennung), gilt der sauber verbrennende Kraftstoff DME u.a. als Zukunftsoption für den bisher dieselbetriebenen Schwerlastverkehr auf der Straße und auf dem Wasser. Das Ziel des Vorhabens besteht in der Entwicklung einer flexibel operierenden, containerintegrierten Demonstrationsanlage zur Herstellung des Kraftstoffes DME aus Biogas. Bei Verfügbarkeit von erneuerbarem Elektrolysewasserstoff wird dieser dem Prozess zugeführt, um die DME-Produktion und die stoffliche Nutzung des Treibhausgases zu steigern.

[Projekt FlexDME - energiesystem-forschung.de](http://energiesystem-forschung.de)

### **ISystem4EFuel**

#### **Intelligentes System zum Einsatz von strombasierten Kraftstoffen**

Im Rahmen des Forschungsprogramms ISystem4EFuel wurde der Einsatz intelligenter, vernetzter Subsysteme an Großmotoren untersucht, und deren Potenzial aufgezeigt, den Betrieb mit neuartigen, teilweise nur mangelhaft erprobten Kraftstoffen oder Gemischen (weltweite E-Fuels insbesondere im maritimen Umfeld) zu optimieren bzw. betriebssicher darzustellen.

[Projekt ISystem4EFuel - energiesystem-forschung.de](http://energiesystem-forschung.de)

### **KEROSyN100**

#### **Entwicklung und Demonstration einer dynamischen, effizienten und skalierbaren Prozesskette für strombasiertes Kerosin – Phase 1**

Im Rahmen des Forschungsprojektes KEROSyN100 arbeiteten sieben Partner aus Forschung und Industrie zusammen, um strombasiertes Kerosin einer Markteinführung anzunähern. Zu diesem Zweck wird die erste Power-to-Liquid Anlage zur Herstellung von synthetischem Kerosin über die Methanol-Route entwickelt. Die Umsetzung einer entsprechenden Demonstrationsanlage ist in der Raffinerie Heide in Schleswig-Holstein vorgesehen.

[www.kerosyn100.de](http://www.kerosyn100.de)

### **leanStoichH2**

#### **Umsetzung einer Wasserstoffbeimengung an einem stationären Gasmotor und Bestimmung des Einflusses auf den Verschleiß**

Das Projekt hat den Einfluss der Beimengung an Wasserstoff (H<sub>2</sub>) auf das Brennverfahren und den Verschleiß für drei unterschiedliche Erdgas-H<sub>2</sub>-Gemischstrategien durch numerische und experimentelle Methoden untersucht. Dies erfolgt durch die Entwicklung eines für H<sub>2</sub> angepassten Zündsystems, die Integration der Wassereinspritzung und Abgasrückführung (AGR) sowie eine AGR-Kühlung.

[Projekt LeanStoichH2 - energiesystem-forschung.de](http://energiesystem-forschung.de)

### **MEEMO**

#### **Methanol aus erneuerbarer Energie für Mobilität mit Plug-in-Hybridfahrzeugen**

Um die Dekarbonisierung des Verkehrssektors voranzutreiben, bieten Plug-in-Hybridfahrzeuge (PHEV) ein großes Potenzial, da sie durch den Einsatz von regenerativem Strom und strombasierten Kraftstoffen einen CO<sub>2</sub>-neutralen Betrieb und gleichzeitig hohe Reichweiten und schnelle Betankungen ermöglichen. Um die vorhandene Infrastruktur weiter zu nutzen, bietet sich u. a. strombasiertes Methanol als Ersatz für Ottokraftstoffe an. Im Rahmen des Projektes wurden Fragen zur Eignung von Methanol als Kraftstoff für moderne Verbrennungsmotoren geklärt sowie Handlungsbedarfe aufgezeigt. Die erzielbaren Wirkungsgrade wurden im Rahmen einer ganzheitlichen Betrachtung über den gesamten Lebenszyklus eines Plug-in-Hybridfahrzeugs ermittelt.

[Projekt MEEMO - energiesystem-forschung.de](http://energiesystem-forschung.de)

### **MENA-Fuels**

#### **Roadmaps zur Erzeugung nachhaltiger synthetischer Kraftstoffe im MENA-Raum zur Dekarbonisierung des Verkehrs in Deutschland**

Das Vorhaben MENA-Fuels hat analysiert, welche Rolle der MENA-Region (Middle East / North Africa) bei der Versorgung Deutschlands (und der EU) mit synthetischen Kraftstoffen oder deren Vorprodukten zukommen könnte. Das Projekt liefert damit Orientierungswissen für Vorhaben, die die MENA-Staaten als strategische Partner für synthetische Kraftstoffe ins Auge fassen. Das Projekt wurde zur Validierung mittels Stakeholder von zwei Expertenbeiräten begleitet, die einerseits interessierte Industrievertreter aus Deutschland und andererseits relevante Akteure aus der MENA-Region umfassten.

[Roadmaps zur Erzeugung nachhaltiger synthetischer Kraftstoffe im MENA-Raum zur Dekarbonisierung des Verkehrs in Deutschland - Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie \(wupperinst.org\)](http://wupperinst.org)

### **MethQuest**

#### **Erzeugung und Einsatz von Methan aus erneuerbaren Quellen in mobilen und stationären Anwendungen**

Im Forschungsprojekt MethQuest wurden Verfahren zur Erzeugung von erneuerbarem Methan neu- und weiterentwickelt. Außerdem wurden Motoren für Autos, Schiffe und zur Stromgewinnung für den Betrieb mit Methan optimiert. Darüber hinaus hat MethQuest Lösungen zur Kopplung von Strom-, Gas- und Wärmeinfrastruktur erarbeitet und Auswirkungen und Nutzen einer großflächigen Einführung von erneuerbarem Methan ins deutsche Energiesystem betrachtet. Das Leitprojekt MethQuest umfasste sechs Verbundprojekte: MethFuel, MethCar, MethPower und MethMare fungierten als Komponentenentwickler, die den Verbundprojekten MethGrid und MethSys, die jeweils umklammernden Charakter hatten, Daten lieferten.

[MethQuest - Mit erneuerbarem Methan die Energiewende voranbringen.](#)

### **NAMOSYN**

#### **Nachhaltige Mobilität durch synthetische Kraftstoffe**

Eng mit der vom BMWK geförderten Forschungsinitiative EiV verbunden war auch der vom BMBF geförderte Forschungsverbund NAMOSYN. Im Rahmen von NAMOSYN wurde erforscht, welchen Beitrag synthetische Kraftstoffe zur Energiewende im Verkehrssektor leisten können. Ziel des Projektes war es, synthetische Kraftstoffe für Diesel- und Ottomotoren zu entwickeln und zu testen, die nachhaltig produziert und genutzt werden können.

[www.namosyn.de](http://www.namosyn.de)

### **PlasmaFuel**

#### **Entwicklung eines plasmagestützten Verfahrens zur Produktion von schadstofffreiem Schiffsdiesel**

Ziel im Verbundprojekt PlasmaFuel war die Entwicklung eines Verfahrens zur energieeffizienten Herstellung von schadstofffreiem Schiffsdiesel aus Kohlenstoffdioxid. Hierfür wurde die Spaltung von CO<sub>2</sub> zu CO mittels einer plasmainduzierten Reduktion unter Normaldruck erforscht und angewendet. Die nötige Energie soll von Windüberschussstrom geliefert werden. Wasserstoff wird zusammen mit dem zuvor im Plasmaverfahren erzeugten CO mittels Fischer-Tropsch-Reaktor zu Schiffsdiesel synthetisiert. Eine computergestützte Optimierung ermöglicht das effiziente Führen des Gesamtsystems.

[Projekt PlasmaFuel - energiesystem-forschung.de](#)

### **PowerFuel**

#### **Demonstration und Potenzialanalyse neuer Technologien zur Sektorkopplung für die Erzeugung von Synthesekraftstoff aus Kohlenstoffdioxid**

Für die Energiewende im Verkehrssektor betrachtet das Verbundvorhaben PowerFuel eine Kopplung führender Technologien zur Umwandlung von Strom in flüssige Kraftstoffe. Technologisch wird dies ermöglicht, indem strombasierter Wasserstoff aus der Wasserelektrolyse und Kohlenstoffdioxid, abgeschieden aus der Umgebungsluft, zu Kohlenwasserstoffen umgesetzt

werden. PowerFuel baut auf eine im Wesentlichen vorhandene Infrastruktur im Pilotmaßstab, d.h. Teilsystemen aus dem so genannten Energy Lab 2.0 am Standort KIT, auf. Die benötigte Infrastruktur besteht aus PEM-Elektrolyse, CO<sub>2</sub>-Abscheidung, CO<sub>2</sub>-Konvertierung und Kraftstoffsynthese mit einer Kapazität von ca. 200-300 l/Tag.

[Projekt PowerFuel - energiesystem-forschung.de](http://energiesystem-forschung.de)

### **EnEff: Bremerhaven – Smartes Hafen-Applikationskonzept zur Integration erneuerbarer Energien (SHARC)**

Das Projekt EnEff: Bremerhaven – Smartes Hafen-Applikationskonzept zur Integration erneuerbarer Energien (SHARC) hat die Einbindung erneuerbarer Energiequellen in die Hafeninfrastuktur und -suprastruktur sowie die logistischen Betriebsprozesse für verschiedene Zukunftsszenarien, beispielhaft für das Hafenquartier „Überseehafen“ in Bremerhaven, untersucht. Durch die Modellierung verschiedener Szenarien und unter Berücksichtigung verschiedener Effekte (Energieverbrauch, Kosten, CO<sub>2</sub>-Reduzierungen, Umweltwirkungen) wurden besonders vorteilhafte Szenarien herausgearbeitet. Die Ergebnisse dienen der nachhaltigen Weiterentwicklung des Hafenquartiers.

[S H A R C \(sharc-project.de\)](http://sharc-project.de)

### **SolareKraftstoffe**

#### **Solare Kraftstoffe für den Energiemix der Zukunft**

Das Projekt Solare Kraftstoffe für den Energiemix der Zukunft (SolareKraftstoffe) ging der Frage nach, in welchem Maße die Herstellung und Nutzung von Kraftstoffen aus solarthermischen Herstellungsverfahren als Drop-In-Kraftstoffe Beiträge zu einer zügigen Reduzierung der fossilen CO<sub>2</sub>-Emissionen aus dem Verkehr leisten können. Das generelle Ziel war es, die gesamte Prozesskette solar produzierter Kraftstoffe, von der Herstellung bis hin zur technischen Nutzung, abzubilden und zu bewerten. Weitere Ziele waren, aus der Vielzahl möglicher Drop-In-Kraftstoffe eine Auswahl hinsichtlich Effizienz zu treffen, die Produkt-Selektivität in Bezug auf den Herstellungspfad zu ermitteln und das Verbrennungsverhalten im Hinblick auf eine Eignung als Drop-In-Kraftstoff zu analysieren. Durch Quantifizierung von ökologischen und ökonomischen Parametern wurde der gesamte Lebenszyklus der so hergestellten und genutzten Kraftstoffe bewertet.

[Projekt SolareKraftstoffe - energiesystem-forschung.de](http://energiesystem-forschung.de)

### **SynLink**

#### **Synthetic e-Fuels as key enabler for Sector Linking**

Das Forschungsvorhaben SynLink hat die gesamte Wertschöpfungskette der Kraftstoffherstellung aus Wasser, CO<sub>2</sub> und erneuerbarer Elektroenergie bis hin zur Kraftstoffbereitstellung für verschiedene mobile Anwendungsbereiche abgedeckt – technisch und ökonomisch. Mittels einer Direct Air Capture Anlage wird CO<sub>2</sub> aus der Luft gewonnen. CO<sub>2</sub> und Wasserdampf werden in einer Co-Elektrolyse unter Nutzung erneuerbarer Elektroenergie in Synthesegas umge-

wandelt. Aus dem Synthesegas wiederum werden über verschiedene Synthesewege Kraftstoffe erzeugt. Die Syntheseprodukte sollen als Blends zu herkömmlichen fossilen Kraftstoffen in gewünschten Verhältnissen beigemischt werden können. Durch techno-ökonomische Analysen wurde die Grundlage geschaffen, um diese Technologien wirtschaftlich umsetzen zu können.

[Projekt SynLink - energiesystem-forschung.de](http://energiesystem-forschung.de)

## 2 Methodik: Kraftstoffpfade und Rahmenannahmen

Die wissenschaftlichen Analysen und vergleichenden Bewertungen werden auf der Basis abgestimmter Kraftstoffpfade und einheitlicher Rahmenannahmen durchgeführt.

Grundsätzlich werden in BEniVer zwei Typen von Kraftstoffpfaden betrachtet:

- Referenzpfade (fossile bzw. biogene Kraftstoffreferenzen und generische Referenzpfade für synthetische Kraftstoffe)
- Spezifische Kraftstoffpfade der EiV-Verbundvorhaben

### 2.1 Definition Kraftstoffpfad

In den Projekten der Forschungsinitiative wird eine Vielzahl verschiedener Kraftstoffe, Herstellverfahren und Anwendungen betrachtet. Die wissenschaftlichen Analysen und Bewertungen der Begleitforschung erfolgen auf der Basis zuvor definierter Kraftstoffpfade für einen konkreten Kraftstoff sowie einem spezifischen Herstellverfahren und einer Anwendung. Insgesamt werden für einen Kraftstoffpfad folgende Eigenschaften festgelegt:

- die Stromquelle (Netzstrom, Photovoltaik (PV)-Strom etc.) mit den Kosten, Ökobilanzen und den maximal möglichen Vollbenutzungsstunden (VBS)
- die Stoffquellen (Kohlenstoff, Wasserstoff etc.) inkl. Kosten und Ökobilanzen
- der Herstellprozess (Fischer-Tropsch, Methanol-Route u.a.)
- die Zusammensetzung (einschließlich Blendverhältnis und Beimischkomponenten)
- der Verkehrsbereich (Straße, Schifffahrt, Luftfahrt oder Rückverstromung)

*Beispiel:*

*Methanol wird in einem Prozess mit Wasserstoff aus der Proton Exchange Membrane (PEM)-Elektrolyse und Kohlenstoffdioxid (CO<sub>2</sub>) aus einem Zementwerk hergestellt. Der dafür benötigte Strom wird über einen on-shore Windpark bereitgestellt. Eine Kombination verschiedener Stromquellen (Wind kombiniert mit PV) ist nicht möglich. Das hergestellte Methanol wird als Reinstoff in der Schifffahrt in einem Verbrennungsmotor eingesetzt.*

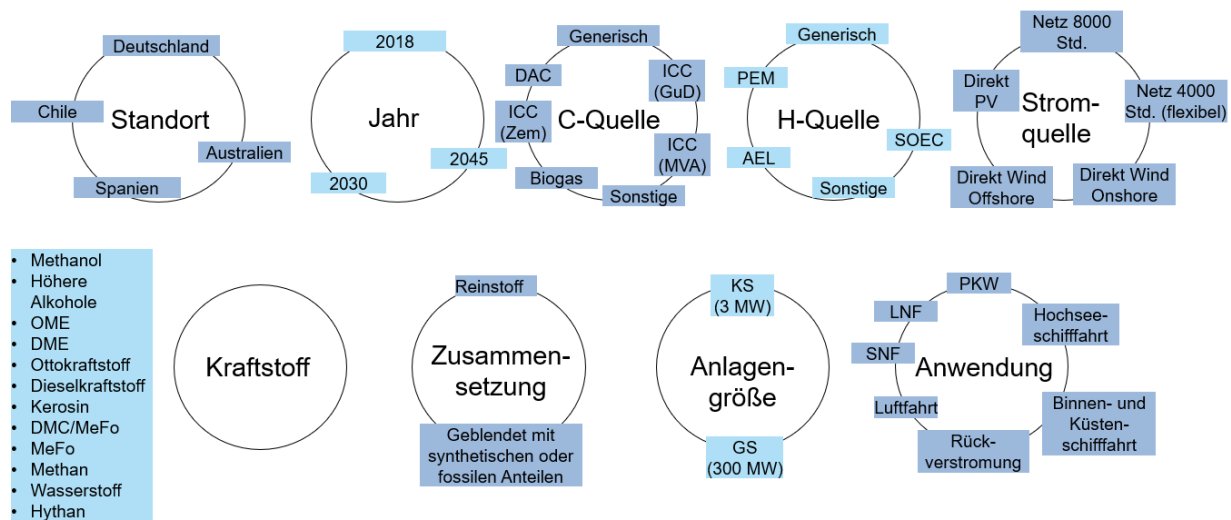


Abbildung 2-1: Eigenschaften von Kraftstoffpfaden

## 2.2 Rahmenannahmen

Die Begleitforschung der Förderinitiative hat die Aufgabe, die Ergebnisse aus den Verbänden transparent nachvollziehbar und vor allem vergleichbar darzustellen. Gerade im Hinblick auf die Kraftstoffherstellungsprozesse ist eine Harmonisierung der Eingangsparameter erforderlich, da die Eingangsgrößen, insbesondere die Stromkosten, einen starken Einfluss auf die Kraftstoffgestehungskosten haben. Um die erforderliche Vergleichbarkeit der Ergebnisse zu gewährleisten, wurden von der Begleitforschung Rahmenannahmen erarbeitet, die für die technische, ökonomische und die ökologische Analyse der Kraftstoffherstellungsprozesse herangezogen wurden. Im Folgenden wird auf die jeweiligen Bereiche der Rahmenannahmen eingegangen.

### 2.2.1 Allgemeingültige Annahmen

*Zu Beginn der Förderinitiative wurden die Stützjahre 2018, 2030 und 2050 ausgewählt. Aufgrund der Änderung des Klimaschutzgesetzes, nach welcher die Bundesregierung bis 2045 Klimaneutralität erreichen will, wurden die Stützjahre angepasst. Für die techno-ökonomische Analyse (TÖA) und die Lebenszyklusanalyse (LCA) ergeben sich dabei keine Änderungen, da in beiden Fällen Klimaneutralität angenommen wird. Die Werte, welche in der Datei der Rahmenannahmen für 2050 angegeben wurden, gelten nun für 2045.*

Um möglichst valide Startwerte für die Bewertung der Kraftstoffherstellungsprozesse zu erhalten, soll zunächst die Analyse für das Jahr **2018** mit **Deutschland** als Produktionsland durchgeführt werden. Darauf basierend werden die perspektivischen Entwicklungen abgebildet und die Ergebnisse für die Jahre **2030** und **2045** ermittelt, ebenfalls mit der Produktion in Deutschland.

Weitere Produktionsstandorte werden im Rahmen der Begleitforschung anhand der generischen Referenzpfade untersucht (siehe Unterkapitel 7.2). Als Größendefinition der Produktionsanlagen wurden die gesamten elektrischen Eingangsleistungen (Elektrolyse + Pumpen etc.) in 2018 herangezogen. Dies ist in Tabelle 2-1 zusammengefasst.

**Tabelle 2-1:** Weitere allgemeingültige Annahmen für Kraftstoffproduktionsanlagen

	$\Sigma$ el. Leistung [MW]	Verkauf von Gasen	Umgebung
Großskalig	ca. 300	möglich	brown-field
Kleinskalig	ca. 3	nicht möglich	green-field

Potentielle Gase, die verkauft werden können, sind bspw. Dampf oder Sauerstoff. Es wird davon ausgegangen, dass sich Abnehmer und Lieferanten für alle Medien in direkter Nachbarschaft befinden und daher für diese keine Transportwege anfallen. Dafür sind in der Umgebung eines Chemieparks meist Rohrleitungsnetze vorhanden, so dass die Gase direkt an der Anlagengrenze verkauft bzw. gekauft werden können.

### **2.2.2 Technische Annahmen**

Die technischen Eingangsgrößen beinhalten u.a. typische Wirkungsgrade von Pumpen und Kompressoren sowie die erforderlichen Kennzahlen der unterschiedlichen Elektrolýsetechnologien wie Energiebedarf und Stacklebensdauer. Darüber hinaus sind die Werte der maximalen Volllaststunden in Abhängigkeit von der jeweiligen Stromquelle aufgelistet.

Weitere technische Annahmen sind für die Kohlenstoffbereitstellung erforderlich. Hierbei sind der Energiebedarf für die Bereitstellung von CO<sub>2</sub> aus der Luft (Direct Air Capture = DAC) sowie typische Abgaszusammensetzungen von verschiedenen Punktquellen angegeben.

### **2.2.3 Ökonomische Annahmen**

Die ökonomischen Eingangsgrößen beinhalten zum einen Kostendaten zur Ermittlung der Investitionsausgaben für die Elektrolyseure und DAC-Anlagen. Des Weiteren sind Zahlenwerte für die Kostenschätzmethodik angegeben. Diese sind erforderlich, um auf Basis der Ausrüstungskosten einer Anlage die gesamten Investitionsausgaben zu erhalten. Weitere Werte sind der Zinssatz zur Beschaffung von Fremdkapital sowie die Anzahl der Jahre, über welche die Investitionsausgaben abgeschrieben werden können.

Den höchsten Einfluss auf die Produktionskosten haben die Stromkosten, die mit und ohne Steuern bzw. Abgaben für die jeweiligen Jahre und Stromquellen angegeben sind.

### **2.2.4 Ökologische Annahmen**

Für die Ermittlung des Global Warming Potentials (GWP) der jeweiligen Kraftstoffherstellungsprozesse sind die Ökobilanzen für die Bereitstellung von Strom sowie der generischen H<sub>2</sub>- und CO<sub>2</sub>-Bereitstellung angegeben. Die generischen Annahmen werden im folgenden Kapitel genauer erläutert.



### **2.2.5 Sonderfall - Generische Annahmen**

Neben der Stromquelle haben bei PtX-Prozessen die H- und C-Quellen einen großen Einfluss auf die Ergebnisse der techno-ökonomischen und ökologischen Analyse. Um jedoch den Fokus auf die Kraftstoffe und die eigentlichen Synthesen zu legen, wurden „generische“ H- und C-Quellen definiert. Dabei wird H<sub>2</sub> und CO<sub>2</sub> jeweils als over the fence (OTF) bereitgestellt angenommen. Da es durch die verschiedenen H- und C-Quellen eine Vielzahl an Kombinationsmöglichkeiten gibt, ist die Vereinfachung ebenfalls von Vorteil. Es wurden daher generische Zusammenstellungen der Quellen eingeführt. Diese Generalisierung vereinfacht den Vergleich der Ergebnisse, führt allerdings intrinsisch nicht zum technisch und ökonomisch optimalem Ergebnis. So ist ohne eine deutliche Steigerung der Komplexität keine Möglichkeit der Wärmeintegration, bspw. bei der Dampfelektrolyse oder der Bereitstellung von Dampf für die CO<sub>2</sub>-Wäsche gegeben. Weitere Optimierungen und Sonderanwendungen sind bereits vielfach in einschlägiger Fachliteratur veröffentlicht, haben aber stets den Nachteil einer schwierigen Vergleichbarkeit der Ergebnisse.

Die generischen Annahmen werden den generischen Referenzpfaden für synthetische Kraftstoffe zugrundegelegt. Bei den generischen Referenzpfaden wird nur die großskalige Synthese (300 MW) betrachtet.

#### **Generische Stromquelle**

Bei den generischen Pfaden wird der erforderliche elektrische Strom aus dem Netz bezogen. Die angenommene Anzahl der Volllaststunden beträgt 8000 Stunden pro Jahr.

**Tabelle 2-2:** Rahmenannahmen für die generische Stromquelle<sup>1</sup>

<b>Generische Stromquelle (Netzbezug 8.000 h/a)</b>	<b>2018</b>	<b>2030</b>	<b>2045</b>
Kosten Netzstrom in € <sub>2018</sub> /MWh	44	66	40
Abgaben und Umlagen in € <sub>2018</sub> /MWh - min	11	0,6	0,4
Abgaben und Umlagen in € <sub>2018</sub> /MWh - max	43	34	23
<b>Endkundenpreise Netzstrom in €<sub>2018</sub>/MWh - min</b>	<b>56</b>	<b>66</b>	<b>41</b>
<b>Endkundenpreise Netzstrom in €<sub>2018</sub>/MWh - max</b>	<b>89</b>	<b>99</b>	<b>63</b>
THG-Emissionen in t CO <sub>2</sub> -Äq./MWh	0,506	0,131	0,052

#### **Generische Wasserstoffquelle**

Für die generische H-Quelle wird zunächst eine technische, ökonomische und ökologische Analyse der PEM-Elektrolyse, der alkalischen Elektrolyse und der Hochtemperatur-Elektrolyse

<sup>1</sup> Werte für 2030 und 2045 basierend auf Simulationen zur möglichen Entwicklung.

(SOEC) durchgeführt. Der finale Druck des Wasserstoffs wurde für jede Elektrolysetechnologie auf 50 bar festgelegt. Falls der Elektrolysedruck nicht ausreicht, wird der finale Druck durch Kolbenkompressoren erreicht. Die generischen H<sub>2</sub>-Bereitstellungswerte werden aus dem arithmetischen Mittelwert von PEM, AEL und SOEC bestimmt.

**Tabelle 2-3:** Rahmenannahmen für die generische Wasserstoffquelle (großskalig)

Generische Wasserstoffquelle	2018	2030	2045
Kosten in €/kg H <sub>2</sub> - min	4,8	4,0	2,4
Kosten in €/kg H <sub>2</sub> - max	6,5	5,9	4,3
El. Leistungsbedarf pro t H <sub>2</sub> /h in MW	49,8	46,8	44,0
THG-Emissionen in kg CO <sub>2ä</sub> / kg H <sub>2</sub>	24,8	6,1	2,3

### **Generische Kohlenstoffquelle**

Für die generische C-Quelle wird zunächst eine technische, ökonomische und ökologische Analyse der CO<sub>2</sub>-Bereitstellung mittels der Niedertemperatur-DAC-Technologie und über MEA-Wäschen nach unterschiedlichen CO<sub>2</sub>-Punktquellen durchgeführt. Die Punktquellen (Zementwerk, Gas-und-Dampf-Anlage (GuD-Anlage) und Müllverbrennungsanlage (MVA)) unterscheiden sich durch den Anteil an CO<sub>2</sub> im Abgas.

Die jeweiligen angenommenen Anteile am generischen CO<sub>2</sub> werden für die unterschiedlichen Jahre angepasst und sind in Tabelle 2-4 aufgelistet.

**Tabelle 2-4:** Anteilige Zusammensetzung des generischen CO<sub>2</sub>

Kohlenstoffquelle und deren Anteil	2018	2030	2045
DAC	0 %	5 %	10 %
MEA   Zementwerk	70 %	60 %	45 %
MEA   GuD-Anlage	15 %	20 %	25 %
MEA   MVA	15 %	15 %	20 %

Der Druck nach jeder C-Quelle liegt bei 3 bar. Dieser wird durch eine nachgeschaltete Kompression nach der eigentlichen CO<sub>2</sub>-Bereitstellung erreicht. Somit steht auch das generische CO<sub>2</sub> bei einem Druck von 3 bar zur Verfügung. Die Daten des generischen CO<sub>2</sub> sind in Tabelle 2-5 aufgelistet.

**Tabelle 2-5:** Rahmenannahmen für die generische Kohlenstoffquelle (großskalig)

Generische Kohlenstoffquelle	2018	2030	2045
Kosten in €/t CO <sub>2</sub> - min	67,2	80,4	87,9
Kosten in €/t CO <sub>2</sub> - max	71,2	86,9	96,0
Leistungsbedarf pro t CO <sub>2</sub> /h in kW	123,3	160,0	200,9
THG-Emissionen in kg CO <sub>2</sub> -Äq./kg CO <sub>2</sub> (CO <sub>2</sub> -Abscheidung zu <u>Quelle</u> alloziert)	0,07	0,03	0,02
THG-Emissionen in kg CO <sub>2</sub> -Äq./kg CO <sub>2</sub> (CO <sub>2</sub> -Abscheidung zu <u>Kraftstoff</u> alloziert)	-0,93	-0,97	-0,98

### **Fahrzeuge und Kraftstoffverbräuche für die Nutzung der Kraftstoffe**

Um die Nutzung der Kraftstoffe innerhalb der Sektoren Pkw, leichte Nutzfahrzeuge, schwere Nutzfahrzeuge, Schifffahrt und Luftfahrt vergleichbar darzustellen, wurden die jeweiligen Verbräuche je Fahrzeugtyp und Kraftstoff festgelegt. Die Verbräuche wurden ebenfalls im Methodikleitfaden für Ökobilanzierungen [Pichlmaier et al. 2021] veröffentlicht.

Die Annahmen, die im Sektor Pkw zugrunde gelegt wurden, sind in Tabelle 2-6 aufgelistet.

**Tabelle 2-6:** Kraftstoffverbrauch Pkw je Kraftstoff in kg auf 100 km für verschiedene Jahre

Kraftstoff	2018	2030	2045	Kommentar	Quellen
<b>Benzin, Referenz</b>	5,3	5,0	4,2		[INFRAS 2019]
<b>Erdgas, Referenz</b>	4,9	4,5	3,6	CNG im Ottomotor	[INFRAS 2019]
<b>Syn. Benzin</b>	5,2	4,9	4,1		[INFRAS 2019; European Commission et al. 2020]
<b>Syn. Methan</b>	4,7	4,3	3,5	CNG im Ottomotor	[INFRAS 2019; European Commission et al. 2020; Huss A und Weingerl P 2020]
<b>Syn. Methanol</b>	10,5	9,9	8,2		[INFRAS 2019; Schröder et al. 2020; Fan et al. 2010]
<b>Syn. Hythan</b>	4,6	4,2	3,4		[INFRAS 2019; Nitnaware und Suryawanshi 2019]

Für die Berechnung des Kraftstoffverbrauchs über den gesamten Lebenszyklus wird eine Fahrleistung von 200.000 km angenommen.

Im Straßengüterverkehr wird eine Sattelzugmaschine mit einem zulässigen Gesamtgewicht von 34-40 t und einer Gesamtfahrleistung von 940.000 km als Referenzfahrzeug angenommen. Die folgende Tabelle zeigt die Kraftstoffverbräuche für den Lkw-Betrieb mit verschiedenen Kraftstoffen.

**Tabelle 2-7:** Kraftstoffverbrauch SNF je Kraftstoff in kg auf 100 km für verschiedene Jahre

Kraftstoff	2018	2030	2045	Kommentar	Quellen
<b>Diesel, Referenz</b>	28,1	22,9	17,5		[INFRAS 2019]
<b>Erdgas, Referenz</b>	24,9	20,3	15,4		[INFRAS 2019]
<b>Syn. Diesel</b>	26,7	21,8	16,6		[INFRAS 2019; Song et al. 2012]
<b>Methanol</b>	61,2	50,0	38,0		[Berber 2019]
<b>Methan</b>	24,9	20,3	15,4	LNG im Dieselmotor	[INFRAS 2019; Röck et al. 2020]
<b>DME</b>	42,2	34,4	26,2		[INFRAS 2019; Röck et al. 2020]

Für leichte Nutzfahrzeuge werden für eine Gesamtfahrleistung von 239.000 km die in der folgenden Tabelle dargestellten Verbräuche angenommen.

**Tabelle 2-8:** Kraftstoffverbrauch LNF je Kraftstoff in kg auf 100 km für verschiedene Jahre

Kraftstoff	2018	2030	2045	Quellen
<b>Syn. Diesel</b>	0,078	0,067	0,067	[INFRAS 2019]
<b>DME</b>	0,120	0,098	0,074	[INFRAS 2019]

Beim Schiffsverkehr wurde als Referenzschiff ein Containerschiff mit einer Tragfähigkeit von 43.000 DWT (deadweight tonnage) und einer Lebensdauer von 25 Jahren betrachtet. Dabei wird angenommen, dass das Referenzschiff über seine gesamte Lebensdauer eine Distanz von 1.040.250 Nautischen Meilen (nm) zurücklegt und dabei eine Transportleistung von  $4,47 \cdot 10^{10}$  Tonnen-Nautische-Meilen ( $t \cdot nm$ ) erbringt [Chatzinikolaou und Ventikos 2016].

**Tabelle 2-9:** Verbrauch an Kraftstoff in kg nach Kraftstofftyp im Sektor Schifffahrt für verschiedene Jahre in kg/km

Kraftstoff	2018	2030	2045	Kommentar	Quellen
<b>Maritimer Diesel, Referenz</b>	65,01	57,62	47,13		[EMSA 2021]
<b>Erdgas, Referenz</b>	58,05	51,45	42,08		[Bengtsson et al. 2011]
<b>Syn. Diesel</b>	65,01	57,62	47,13	Annahme, gleich wie Diesel Referenz	
<b>Methan</b>	58,05	51,45	42,08	In Relation zu Referenzkraftstoff für Referenzschiff abgeleitet	[Bengtsson et al. 2011; Yoo 2017]
<b>Methanol</b>	134,67	119,37	97,63	In Relation zu Referenzkraftstoff für Referenzschiff abgeleitet	[Ammar 2019; ICF International 2009]
<b>Ammoniak</b>	113,06	100,21	81,97		[Lewis 2018]

Für den Flugverkehr wird ein Airbus A330-200 als meistverwendetes Passagierlinienflugzeug für die Definition einer Referenztechnologie verwendet. In folgender Tabelle sind alle Annahmen für den Betrieb dieses Flugzeugs auf einer mittleren Distanz angegeben.

**Tabelle 2-10:** Betrieb Flugverkehr mit Strecke, Start- und Landezyklen, Passagieranzahl, Lebensflugleistung und Treibstoffbedarf [Burzlaff 2017; Airbus 2021a]

Kraftstoff	Strecke in km	Start- und Landezyklen	Passagieranzahl	Lebensflugleistung in Pkm	2018 kg/km	2030 kg/km	2050 kg/km
<b>Kerosin Referenz</b>	3.300	30.000	247	2,74*10 <sup>10</sup>	8,82	7,36	5,44
<b>Syn. Kerosin</b>	3.300	30.000	247	2,74*10 <sup>10</sup>	8,82	7,36	5,44

## 2.3 Ziel und Methodik der Ökobilanz

Die Ökobilanz (engl. Life Cycle Assessment - LCA) ist eine Methode, um die potenziellen Umweltwirkungen von Produkten, Prozessen und Dienstleistungen über den gesamten Lebenszyklus zu bewerten [DIN EN ISO 14044; DIN EN ISO 14040]. Die Durchführung der LCA beinhaltet vier Phasen: die Festlegung des Ziels und Untersuchungsrahmens, die Sachbilanz, die Wirkungsabschätzung und die Auswertung der Ergebnisse.

### Ziel und Untersuchungsrahmen

Ziel der LCA ist die ökologische Bewertung und der Vergleich verschiedener Pfade im Rahmen der Bewertungsmatrix. Darüber hinaus soll die LCA als Entscheidungsgrundlage für politische Maßnahmen und regulatorische Voraussetzungen dienen und so die Nachhaltigkeit synthetischer Kraftstoffe und ihrer Anwendungen sicherstellen.

In dieser LCA wird der **gesamte Lebenszyklus** eines Kraftstoffs zur Nutzung im Verkehr einbezogen. Dieser umfasst die Rohstoffbereitstellung, die Kraftstoffherstellung und die Nutzung. Folgende Abbildung 2-2 zeigt die Systemgrenze und funktionelle Einheit der LCA. Die in einem Kasten mit durchgezogenenr Linie dargestellten Prozesse sind sogenannte Vordergrund (Foreground)-Prozesse. Für die Vordergrund-Prozesse werden die Energie- und Stoffströme im Modell detailliert dargestellt sowie, basierend auf Literaturquellen oder Ergebnissen aus anderen Arbeitspaketen, quantifiziert. Die Hintergrund-Prozesse (Background-Prozesse), welche mit gestrichelter Linie dargestellt sind, werden aus einer Ökobilanzdatenbank entnommen und nicht selbst modelliert. In allen Ökobilanzen wird dafür die Datenbank ecoinvent Version 3.6 [Wernet et al. 2016] verwendet.

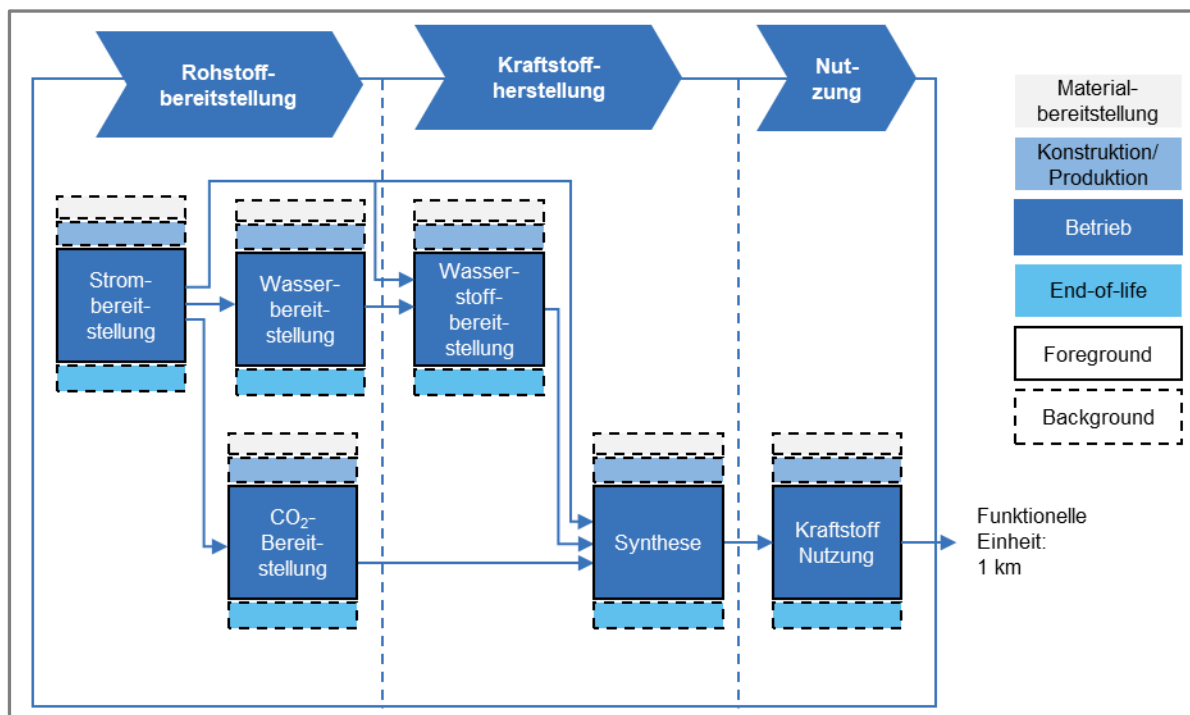


Abbildung 2-2: Kraftstoff-Lebenszyklus

Für alle Pfade wird als Bezugsgröße die **funktionelle Einheit** 1 km gewählt, unabhängig davon, in welchem Sektor der Kraftstoff angewendet wird. Da kein Bezug zur Anzahl der transportierten Personen oder zur Masse des transportierten Guts gemacht wird, kann ein Vergleich nur innerhalb eines Transportsektors erfolgen. Folgende beiden **Kategorien** und ihre Charakterisierungsfaktoren, Wirkungsindikatoren und Wirkungsabschätzungsmethoden werden zur Bewertung verwendet:

- Klimaänderung (Charakterisierungsfaktor: Global Warming Potential (GWP) 100; Wirkungsindikator: kg CO<sub>2</sub>-Äquivalente; Wirkungsabschätzungsmethode ReCiPe 2013) und
- Kumulierter Energieaufwand (Charakterisierungsfaktor: Kumulierter Energieaufwand fossil (KEA), Wirkungsindikator: MJ-Äquivalente; Wirkungsabschätzungsmethode: angelehnt an VDI 4600)

**Geographischer Rahmen:** Wenn nicht explizit anders angegeben, wird angenommen, dass die Herstellung und die Nutzung in Deutschland stattfinden. Dementsprechend werden keine Transportwege in der Vordergrund-Modellierung veranschlagt und der deutsche Strommix als Stromquelle verwendet.

**Zeitlicher Bezug:** Es werden die in den Rahmenannahmen beschriebenen Jahre 2018, 2030 und 2045 modelliert. Für den Strommix wird der zukünftige Strommix aus dem MuSeKo THG95-Szenario verwendet [Fette et al. 2020].

**Allokation:** Da beim Fischer-Tropsch-Prozess mehrere Kraftstofffraktionen (Benzin, Diesel und Kerosin) entstehen, wird die energetische Allokation verwendet. Das in der CO<sub>2</sub>-Abscheidung abgeschiedene CO<sub>2</sub> wird dem Kraftstoff gutgeschrieben, aber bei Auswertungen getrennt ausgewiesen.

### Sachbilanz

Als Datengrundlage für die Vordergrund-Prozesse werden folgende Quellen herangezogen:

- Strommix: MuSeKo THG95-Szenario [Fette et al. 2020]
- Materialbereitstellung und Bau der Wasserbereitstellung, CO<sub>2</sub>-Bereitstellung und Elektrolyse: Verschiedene Literaturquellen, siehe LCA-Methodikleitfaden [Pichlmaier et al. 2021]
- Betrieb der Synthese, der Elektrolyse und der CO<sub>2</sub>-Bereitstellung: basierend auf Modellierung der techno-ökonomischen Analyse in BeniVer (vgl. 2.4)
- Nutzungsphase Kraftstoffverbrauch: verschiedene Literaturquellen, siehe LCA-Methodikleitfaden [Pichlmaier et al. 2021]
- Nutzungsphase direkte Emissionen: verschiedene Quellen siehe FfE Open Data Portal [FfE 2020]

Die genauen Datenquellen sowie die Sachbilanzdaten können dem LCA-Methodikleitfaden [Pichlmaier et al. 2021] bzw. den veröffentlichten Daten entnommen werden.

Als Hintergrunddatenbank wird die Ökobilanzdatenbank ecoinvent 3.6 (cut-off) verwendet. Im Gegensatz zu den Vordergrund-Prozessen werden die Hintergrund-Prozesse der Datenbank

zunächst nicht an zukünftige Entwicklungen für die Jahre 2030 bzw. 2045 angepasst. In den Sensitivitätsanalysen wird eine Anpassung der Hintergrund-Datenbanken für die generischen Pfade durchgeführt, nicht aber für die Bewertung in der Bewertungsmatrix.

**Annahmen zur Klimabewertung:** Zur Charakterisierung der Klimawirkung werden insbesondere die Emissionen langlebiger Treibhausgase betrachtet. Bei der Kraftstoffherstellung und Nutzung kann es jedoch auch zur Freisetzung kurzlebiger Emissionskomponenten wie beispielsweise Stickoxiden oder Partikeln kommen, die durch ihre chemischen Wirkungen auf die Treibhausgase Ozon und Methan oder durch die Beeinflussung des atmosphärischen Partikelhaushaltes und der Bewölkung ebenfalls relevante Klimawirkungen haben können [IPCC 2021]. Existierende Studien zeigen, dass kurzlebige Emissionskomponenten aus dem Verkehr sehr relevante Klimateffekte hervorrufen [Hoor et al. 2009; Balkanski et al. 2010; Eyring et al. 2010; Uherek et al. 2010; Righi et al. 2013; Grewe et al. 2017; Mertens et al. 2018; Lee et al. 2021]. Im Falle des Luft- und Seeverkehrs sind diese von vergleichbarer Größe wie der entsprechende CO<sub>2</sub>-Effekt oder übertreffen diesen. Zudem sind im Zusammenhang mit kurzlebigen Komponenten Luftqualitätsaspekte zu beachten. Daher sollten diese Komponenten hier nicht unberücksichtigt bleiben und fließen zunächst über die Bewertungen der Kraftstoffnutzung im Rahmen eines vereinfachten, emissionsbasierten Ansatzes in die ganzheitliche Bewertung ein (siehe Kapitel 3.3). Sie werden jedoch im Zusammenhang mit der Kraftstoffherstellung mangels entsprechender Informationen vernachlässigt. Aufgrund der noch sehr begrenzten Kenntnisse zu den Emissionen kurzlebiger Komponenten im Zusammenhang mit der Herstellung und Nutzung synthetischer Kraftstoffe sowie der nachgelagerten Wirkungen auf Klima und Luftqualität, ist hier zukünftig gezielte Forschung erforderlich, die sich auch auf neue Emissionskomponenten richten muss, wie beispielsweise Wasserstoff aus Leckagen und Schlupf. Im Falle des Luftverkehrs sind hierbei auch die Wirkungen auf die Bildung von Kondensstreifen und die resultierenden Klimateffekte zu betrachten.

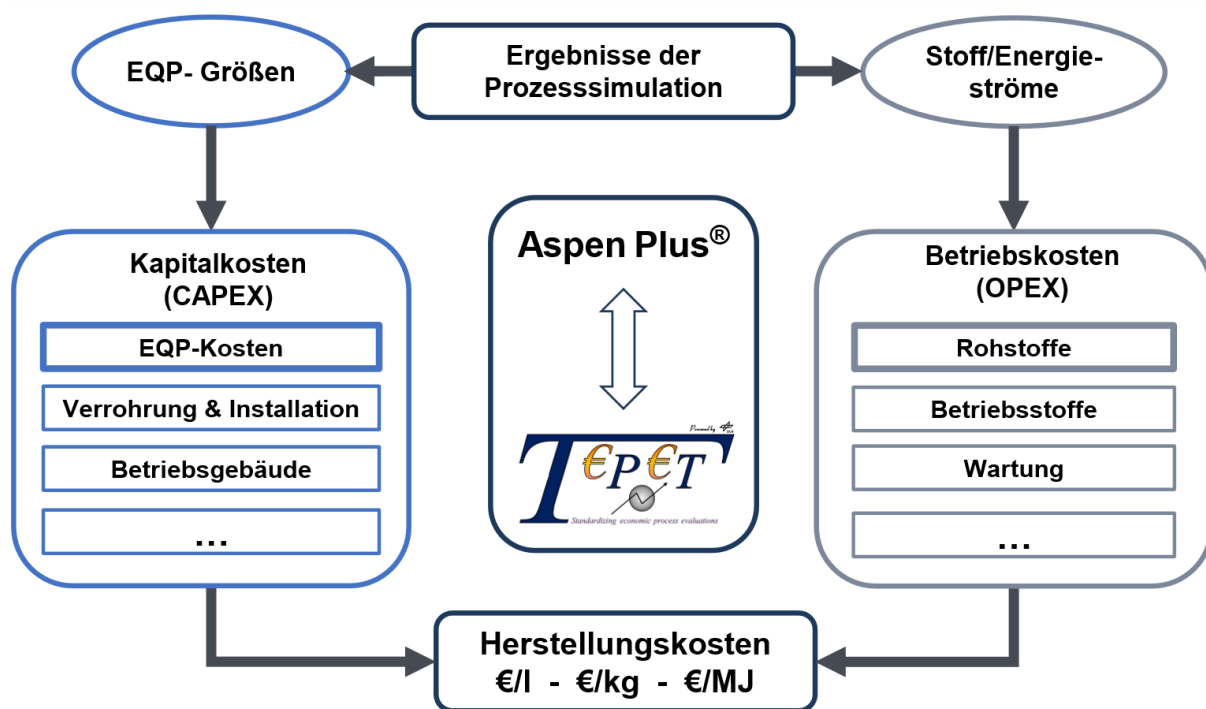
## 2.4 Ziel und Methodik der techno-ökonomischen Analyse (TÖA)

In der TÖA wird der **Herstellungsprozess** eines Kraftstoffs anhand technischer und ökonomischer Gesichtspunkte evaluiert. Die Bilanzgrenze ist die verfahrenstechnische Anlage, in welcher der Kraftstoff hergestellt wird. Dies umfasst die Bereitstellung von H<sub>2</sub> sowie CO<sub>2</sub>, die Umwandlung in die jeweiligen (Zwischen)-Produkte als auch die Entsorgung von Purgegasen und Abwässern. Für die meisten Prozesse (außer es wird gekennzeichnet) wird angenommen, dass die verfahrenstechnische Anlage in einer „brown-field“ Umgebung aufgebaut wird, d.h. dass Nebenprodukte wie Dampf direkt verkauft werden können. Für alle Pfade werden die Gestehungskosten in der **Einheit €<sub>2018</sub>/GJ<sub>LHV</sub>** angegeben, unabhängig davon, in welchem Sektor der Kraftstoff angewandt wird und für welches betrachtete Jahr die Gestehungskosten ermittelt werden.

Die im Folgenden skizzierte Methodik gilt für alle Referenzpfade aus Unterkapitel 2.5 sowie die Pfade der Verbünde, welche die TÖA von der Begleitforschung haben durchführen lassen. Falls ein Verbund die TÖA eigenständig durchgeführt hat, wird durch die in Unterkapitel 2.2 vorgestellten Rahmenannahmen die Vergleichbarkeit der Ergebnisse gewährleistet.



Die Kraftstoffherstellungsprozesse werden in dem kommerziellen Simulationstool ASPEN Plus abgebildet. Dabei werden die Energie- und Massenströme der Edukte, der Produkte sowie der zu entsorgenden Abwässer und Abgase ermittelt. Mit den Ergebnissen der Prozesssimulation werden die technischen Kenngrößen wie beispielsweise der energetische Wirkungsgrad oder die Kohlenstoffausbeute ermittelt. Die Prozesssimulation ist die Basis für die ökonomische Analyse. Folgende Abbildung stellt vereinfacht dar, wie auf Basis der Prozesssimulation die spezifischen Kraftstoffherstellkosten ermittelt werden.



**Abbildung 2-3:** Schematische Darstellung der TÖA-Methodik

Die dabei angewandte Methode basiert auf der Veröffentlichung von [Albrecht et al. 2017].

#### **Allokation:**

Falls es mehrere Produkte gibt, wie beispielsweise bei der Fischer-Tropsch (FT)-Synthese, wird die Allokationsmethode der LCA angewandt.

## **2.5 Referenzpfade**

Die Referenzpfade dienen der Begleitforschung dem Benchmarking mit dem "Stand-der-Technik" und als Referenz für die spezifischen Kraftstoffpfade der EiV-Verbundvorhaben. Zudem werden auf Basis der 16 Referenzpfade umfangreiche Sensitivitätsbetrachtungen (z.B. Standortanalysen) durchgeführt. Auf Grund begrenzter Ressourcen können nicht für alle 33 verbundspezifischen Pfade Sensitivitätsanalysen durchgeführt werden.

Die Referenzpfade werden nochmals unterteilt in fossile bzw. biogene Kraftstoffreferenzen und generische Referenzpfade für synthetische Kraftstoffe. Letztere werden durch generische Quellen definiert (siehe Kap. 2.2.5).

**Tabelle 2-6:** Generische Referenzpfade für synthetische Kraftstoffe

Nr.	Pfadname	Kraftstoffklasse	Zusammensetzung	Fokus-Sektor
1	Syn_Ammoniak_Schiff	Ammoniak	100 % Ammoniak	Schiff (Hochsee)
2	Syn_Benzin_Pkw	Benzin (Ottokraftstoff)	100 % FT-Benzin	Straße (Pkw)
3	Syn_Diesel_Snf	Diesekraftstoff	100 % FT-Diesel	Straße (SNF)
4	Syn_Diesel_Lnf	Diesekraftstoff	100 % FT-Diesel	Straße (LNF)
5	Syn_Diesel_Schiff	Diesekraftstoff	100 % FT-Diesel	Schiff (Hochsee)
6	Syn_DME_Lnf	DME	100 % DME	Straße (LNF)
7	Syn_SAF50_Luft	Kerosin	50 % <sub>Vol</sub> SAF + 50 % <sub>Vol</sub> fossiles Kerosin	Luftfahrt
8	Syn_SAF100_Luft	Kerosin	100 % SAF	Luftfahrt
9	Syn_Hythan_Pkw	Hythan (HCNG)	30 % <sub>Vol</sub> Wasserstoff + 70 % <sub>Vol</sub> Methan	Straße (Pkw)
10	Syn_CNG_Pkw	Methan	100 % Methan	Straße (Pkw)
11	Syn_LNG_Snf	Methan	100 % Methan	Straße (SNF)
12	Syn_LNG_Schiff	Methan	100 % Methan	Schiff (Hochsee)
13	Syn_CNG_Strom	Methan	100 % Methan	Rückverstromung
14	Syn_Methanol_Pkw	Methanol	100 % Methanol	Straße (Pkw)
15	Syn_Methanol_Snf	Methanol	100 % Methanol	Straße (SNF)
16	Syn_Methanol_Schiff	Methanol	100 % Methanol	Schiff (Hochsee)

**Tabelle 2-7:** Fossile und biogene Kraftstoffreferenzen

Nr.	Pfadname	Kraftstoffklasse	Zusammensetzung	Fokus-Sektor
1	Bio_CNG_Pkw	Methan	100 % Biogas	Straße (Pkw)
2	Bio_CNG_Strom	Methan	100 % Biogas	Rückverstromung
3	Bio_HVO_Snf	Dieselmkraftstoff	100 % HVO	Straße (SNF)
4	Fossil_CNG_Pkw	Methan	100 % Erdgas	Straße (Pkw)
5	Fossil_LNG_Snf	Methan	100 % Erdgas	Straße (SNF)
6	Fossil_LNG_Schiff	Methan	100 % Erdgas	Schiff (Hochsee)
7	Fossil_CNG_Strom	Methan	100 % Erdgas	Rückverstromung
8	Fossil_Benzin_Pkw	Benzin (Otto-kraftstoff)	100 % fossiles Benzin	Straße (Pkw)
9	Fossil_Diesel_Snf	Dieselmkraftstoff	100 % fossiler Diesel	Straße (SNF)
10	Fossil_Diesel_Schiff	Dieselmkraftstoff	100 % fossiler Schiffs-diesel	Schiff (Hochsee)
11	Fossil_Kerosin_Luft	Kerosin	100 % fossiles Kerosin	Luftfahrt

## 2.6 Spezifische Kraftstoffpfade der EiV-Verbundvorhaben

Die spezifischen Kraftstoffpfade spiegeln die Forschungsinhalte der EiV-Verbundvorhaben wider. Der Fokus liegt hierbei auf einer Auswahl von Forschungsschwerpunkten der Verbundvorhaben. Eine umfassende Analyse aller in den Forschungsvorhaben betrachteten Verfahren und Anwendungen ist im Rahmen von BEniVer aufgrund begrenzter Ressourcen nicht möglich. Die Definition und Auswahl der betrachteten Pfade wurden mit den Verbundvorhaben abgestimmt. Die Eigenschaften der Strom-, Kohlenstoff- und Wasserstoffquellen wurden in den BEniVer-Rahmenannahmen einheitlich festgelegt (siehe auch Kapitel 2.2).

**Tabelle 2-8:** Spezifische Kraftstoffpfade der EiV-Verbundvorhaben

Nr.	Pfadname	Kraftstoffklasse	Zusammensetzung	Fokus-Sektor	Stromquelle	C-Quelle	H-Quelle
1	C3Mobility_#1.1	Methanol	100 % Methanol	Schiff	Netz 8000 Std.	generisch	generisch
2	C3Mobility_#1.2	Methanol	100 % Methanol	Straße (SNF)	Netz 8000 Std.	generisch	generisch
3	C3Mobility_#2	DME	100 % DME	Straße (LNF)	Netz 8000 Std.	generisch	generisch
4	C3Mobility_#3.1	Benzin (Ottokraftstoff)	100 % MtG-Benzin	Straße (Pkw)	Netz 8000 Std.	generisch	generisch
5	C3Mobility_#4.1	Butanol	100 % Butanol	Straße (LNF)	Netz 8000 Std.	generisch	generisch
6	C3Mobility_#5	Oktanol	100 % Oktanol	Straße (Pkw)	Netz 8000 Std.	generisch	generisch
7	CombiFuel_#1.1	Hythan	30 % <sub>Vol</sub> Wasserstoff + 70 % <sub>Vol</sub> Methan	Straße (LNF)	Direktbezug PV	Biomasse	Sonstiges
8	E2Fuels_#1.1	Methan	100 % Methan (LNG)	Schiff (Hochsee)	Netz 8000 Std.	ICC (sonst.)	PEM
9	E2Fuels_#2.1	Methanol	100 % Methanol	Schiff (Hochsee)	Netz 8000 Std.	ICC	PEM
10	E2Fuels_#3.1	OME	30 % <sub>Vol</sub> OME + fossiler Diesel	Straße (SNF)	Netz 8000 Std.	ICC	PEM
11	E2Fuels_#4	Hythan	25 % <sub>Vol</sub> Wasserstoff + 75 % <sub>Vol</sub> Methan	Rückverstromung	Netz 8000 Std.	ICC	PEM
12	FlexDME_#1	DME	100 % DME	Straße (SNF)	Netz 8000 Std.	Biogas	AEL
13	ISystem4EFuel_#1.1	OME	30 % <sub>Vol</sub> OME + 70 % <sub>Vol</sub> fossiler Diesel	Schiff (Hochsee)		generisch	generisch
14	ISystem4EFuel_#2.1	Diesekraftstoff	30 % <sub>Vol</sub> HVO + 70 % <sub>Vol</sub> fossiler Diesel	Schiff (Hochsee)		-	-
15	KEROSyN100_#1	Kerosin	50 % <sub>Vol</sub> SAF (überwiegend paraffinisch) + 50 % <sub>Vol</sub> fossiles Kerosin	Luftverkehr	Netz 8000 Std.	ICC (sonst.)	AEL
16	LeanStoich2_#1	Hythan	67 % <sub>Vol</sub> Wasserstoff + 33 % <sub>Vol</sub> Methan	Rückverstromung		ICC (sonst.)	PEM
17	MEEMO_#1	Methanol	100 % Methanol	Straße (Pkw)		ICC (sonst.)	AEL
18	MethQuest_#1	Methan	Methan (CNG)	Straße (Pkw)	Netz 4000 Std.	Biogas	PEM
19	MethQuest_#4	Methan	Methan (CNG)	Rückverstromung	Netz 8000 Std.	ICC	SOEC

Nr.	Pfadname	Kraftstoffklasse	Zusammensetzung	Fokus-Sektor	Stromquelle	C-Quelle	H-Quelle
20	MethQuest_#5	Methan	Methan (LNG)	Schiff (Binnen und Küste)	Netz 8000 Std.	DAC	SOEC
21	NAMOSYN_#1.1	OME	100 % OME <sub>2-5</sub>	Straße (Pkw)	Netz 8000 Std.	generisch	generisch
22	NAMOSYN_#2.1	DMC/MeFo	65 % <sub>Vol</sub> DMC (Dimethylcarbonat) + 35 % <sub>Vol</sub> MeFo (Methylformiat)	Straße (Pkw)	Netz 8000 Std.	generisch	generisch
23	NAMOSYN_#2.2	MeFo	15 % <sub>Vol</sub> MeFo + 85 % <sub>Vol</sub> Methanol	Straße (Pkw)	Netz 8000 Std.	generisch	generisch
24	PlasmaFuel_#1	Diesekraftstoff	FT-Diesel	Schiff (Hochsee)	Netz 8000 Std.	ICC (Zem.)	AEL
25	PowerFuel_#1.1	Kerosin	50 % <sub>Vol</sub> SAF (NT-FT-Kerosin) + 50 % <sub>Vol</sub> fossiles Kerosin	Luftverkehr		DAC	PEM
26	PowerFuel_#2.1	Kerosin	50 % <sub>Vol</sub> SAF (HT-FT-Kerosin) + 50 % <sub>Vol</sub> fossiles Kerosin	Luftverkehr		DAC	PEM
27	SolareKraftstoffe_#1	Benzin (Ottokraftstoff)	62 % <sub>Vol</sub> Referenzbenzin + 20 % <sub>Vol</sub> MTBE + 18 % <sub>Vol</sub> FT	Straße (Pkw)		generisch	sonstiges
28	SolareKraftstoffe_#2	Benzin (Ottokraftstoff)	1,6 % <sub>Vol</sub> Referenzbenzin + 0,6 % <sub>Vol</sub> FT + 66,1 % <sub>Vol</sub> MtG + 9,5 % <sub>Vol</sub> Isooktan + 1,4 % <sub>Vol</sub> Isobutanol + 18,3 % <sub>Vol</sub> ETBE + 2,3 % <sub>Vol</sub> MTBE + 0,04 % <sub>Vol</sub> Ethanol	Straße (Pkw)		generisch	AEL
29	SynLink_#1.1	Diesekraftstoff	20 % <sub>Vol</sub> NT-FT-Gemisch mit höheren Alkoholen + 80 % <sub>Vol</sub> fossiler Diesel	Straße (SNF)	Netz 8000 Std.	DAC	Co-SOEC
30	SynLink_#1.2	Diesekraftstoff	20 % <sub>Vol</sub> unraffiniertes Olefin-reicher NT-FT-Diesel + 80 % <sub>Vol</sub> GtL-Diesel	Straße (SNF)	Netz 8000 Std.	DAC	Co-SOEC
31	SynLink_#1.3	Diesekraftstoff	100 % raffinierter NT-FT-Diesel	Straße (SNF)	Netz 8000 Std.	DAC	Co-SOEC
32	SynLink_#2.1	Methanol	100 % Methanol	Schiff (Hochsee)	Netz 8000 Std.	DAC	Co-SOEC
33	SynLink_#2.2	Methanol	15 % <sub>Vol</sub> Methanol + 85 % <sub>Vol</sub> fossiles Benzin	Straße (Pkw)	Netz 8000 Std.	DAC	Co-SOEC

## 2.7 Analyse der Kraftstoffe, Normkonformität und Materialverträglichkeit

### 2.7.1 Überblick: Strombasierte Kraftstoffe der Energiewende im Verkehr

Die im Rahmen von BEniVer betrachteten synthetischen Kraftstoffe lassen sich entsprechend ihrer Zusammensetzung, Molekülstruktur und -größe in sieben verschiedene Gruppen einteilen:

- I. Synthetischer Diesel
- II. Synthetisches Benzin
- III. Synthetisches Kerosin
- IV. Dimethyl- und Oxymethylenether
- V. Methanol und höhere Alkohole
- VI. Weitere oxygenierte Kraftstoffe (Oxygenate)
- VII. Gase (Methan und Hythan (= Methan + Wasserstoff))

Daneben ist auch eine Einteilung gemäß ihrer Herstellung möglich. Hierbei werden in der Hauptsache zwei Prozesswege unterschieden: Zum einem die direkte Kraftstoffsynthese aus Synthesegas im Fischer-Tropsch-Prozess, wobei stets paraffinreiche Kohlenwasserstoffgemische resultieren. Der andere Syntheseweg basiert zunächst auf der Herstellung von Methanol aus Synthesegas. Ausgehend vom Methanol werden unterschiedliche Verfahren entwickelt, um synthetische Kraftstoffe herzustellen. Diese können ebenfalls rein paraffinisch sein oder noch Sauerstoff im Molekül enthalten.

Eine Zusammenfassung der verschiedenen synthetischen Kraftstoffe, die innerhalb der Verbundprojekte (spezifische Pfade) betrachtet werden, ist in Tabelle 2-9 und Tabelle 2-10 gezeigt. Tabelle 2-9 gibt einen Überblick darüber, welcher Kraftstoff für welchen Sektor relevant ist, ob er als Reinkraftstoff oder Blend (d.h. in einer Mischung mit konventionellem, rohölbasiertem Kraftstoff) verwendet werden kann und ob es sich um einen Drop-In- oder Near- bzw. Non-Drop-In-Kraftstoff handelt. Near- und Non-Drop-In wird hier zusammengefasst, da die Unterscheidung v.a. davon abhängig ist, inwieweit eine Umrüstung möglich bzw. sinnvoll ist. In Tabelle 2-11 sind die Definitionen hierzu gegeben. Tabelle 2-10 fasst für die Anwendung relevante physikalische Eigenschaften zusammen.

**Tabelle 2-9:** Übersicht der in BEniVer betrachteten Kraftstoffe mit ihrer Einordnung in Sektoren

	Synthetischer Diesel	Synthetisches Benzin		Synthetisches Kerosin		Ether		Alkohole		Weitere oxygenierte Kraftstoffe		Gase	
	FT-Diesel, HVO	FT-Benzin	MtG	FT-Kerosin	MtJ	DME (CH <sub>3</sub> OCH <sub>3</sub> )	OME	Methanol (CH <sub>3</sub> OH)	Höhere Alkohole	DMC	MeFo	Methan (CH <sub>4</sub> )	Hythan <sup>e)</sup> (CH <sub>4</sub> + H <sub>2</sub> )
<b>Bereich</b>													
<b>Straßenverkehr</b>	X	X	X			X	X	X	X	X	X	X	X
<b>Luftfahrt</b>				X	X								
<b>Schifffahrt</b>	X						X	X				X	
<b>Rückverstromung</b>												X	X
<b>Verwendung</b>													
<b>Reinkraftstoff</b>	X <sup>a)</sup>	X <sup>a)</sup>	X <sup>a)</sup>			X	X	X				X	X
<b>Blend</b>	X	X	X	X	X		X	X	X	X	X		
<b>Drop-In</b>	X	X	X	X <sup>b)</sup>	X <sup>c)</sup>				X <sup>d)</sup>			X	X
<b>Near-/Non-Drop-In</b>						X	X	X	X	X	X		

a) Verwendung als Reinkraftstoff direkt möglich, wenn entsprechende Kraftstoffnorm ([DIN EN 590] für Diesel und [DIN EN 228] für Benzin) erfüllt wird

b) Zulassung gemäß [ASTM D7566] für Verwendung als Drop-In-Treibstoff bis max. 50 %<sub>vol</sub> synthetischer Anteil

c) Theoretisch Drop-In-Treibstoff, aber noch keine Zulassung durch die [ASTM D7566]

d) für 1-Oktanol bis 50 %<sub>vol</sub> möglich

e) Hythan bezeichnet eine Mischung aus Methan und Wasserstoff, Eigenschaften abhängig vom Mischungsverhältnis der Gase

**Tabelle 2-10:** Übersicht der in BEniVer betrachteten Kraftstoffe und deren für die Anwendung relevante Kraftstoffeigenschaften

	Synthetischer Diesel	Synthetisches Benzin		Synthetisches Kerosin		Ether		Alkohole		Weitere oxygenierte Kraftstoffe		Gase	
	FT-Diesel, HVO	FT-Benzin	MtG	FT-Kerosin	MtJ	DME (CH <sub>3</sub> OCH <sub>3</sub> )	OME	Methanol (CH <sub>3</sub> OH)	Höhere Alkohole	DMC	MeFo	Methan (CH <sub>4</sub> )	Wasserstoff (H <sub>2</sub> ) <sup>p)</sup>
<b>T<sub>b</sub> (°C)</b>	360 <sup>a)</sup> (FBP)	210 <sup>f)</sup> (FBP)	Eigenschaften von reinem MtG erfüllen EN 228 nicht, Einsatz als MtG E10 aber möglich (siehe 2.7.2)	205... 300 <sup>h)</sup>	noch nicht zertifiziert (siehe 2.7.3)	-24,8 <sup>i)</sup>	105... 280 <sup>e)</sup>	65 <sup>b)</sup>	99,5... 117,7 <sup>k),m)</sup> 195 <sup>b),n)</sup>	90 <sup>b)</sup>	32 <sup>b)</sup>	-161,5 <sup>b)</sup>	-252 <sup>e)</sup>
<b>T<sub>f</sub> (°C)</b>	-40...6 <sup>b)</sup>	-90,5... -95,4 <sup>b)</sup>		≤ -40 <sup>h)</sup>		≈ -140 <sup>i)</sup>	-70... 48 <sup>e)</sup>	-98 <sup>b)</sup>	-89,5... -114,7 <sup>k),m)</sup> -16 <sup>b),n)</sup>	5 <sup>b)</sup>	-100 <sup>b)</sup>	-182,5 <sup>b)</sup>	-259,1 <sup>p)</sup>
<b>ρ (kg/m<sup>3</sup>) bei 15 °C</b>	765-810 <sup>c)</sup> (800-845 <sup>d)</sup> )	720- 775 <sup>f)</sup>		730-770 <sup>h)</sup>		Gas	961- 1100 <sup>e)</sup>	792 <sup>e)</sup>	801-810 <sup>k),l)</sup> 830 <sup>b),n)</sup>	1007 <sup>b)</sup> (20 °C)	970 <sup>b)</sup> (20 °C)	0,6709 <sup>b)</sup> (Gasdichte)	0,0841 <sup>b)</sup> (Gasdichte)
<b>FP (°C)</b>	≥ 55 <sup>a)</sup>	≤ -35 <sup>b)</sup>		≥ 38 <sup>h)</sup>		-42,2 <sup>b)</sup>	54- 115 <sup>e)</sup>	9 <sup>b)</sup>	24...35 <sup>k),m)</sup> 84 <sup>b),n)</sup>	14 <sup>b)</sup>	-27 <sup>b)</sup>	595 <sup>b)</sup> (Zündtemperatur)	560 <sup>b)</sup> (Zündtemperatur)
<b>CZ</b>	≥ 51 <sup>a)</sup>	--		--		> 55 <sup>i)</sup>	63- 100 <sup>e)</sup>	5 <sup>e)</sup>	17-25 <sup>e)</sup> (n-Butanol)	--	--	--	--
<b>ROZ MOZ</b>	--	≥ 95 <sup>f)</sup> ≥ 85 <sup>f)</sup>		--		--	--	109 <sup>g)</sup> 89 <sup>g)</sup>	96-113 <sup>k),m)</sup> 78-94 <sup>k),m)</sup>	109 <sup>j)</sup> 102 <sup>j)</sup>	115 <sup>j)</sup> 114 <sup>j)</sup>	100 <sup>q)</sup> (Methanzahl)	0 <sup>q)</sup>
<b>H<sub>u</sub> (MJ/kg)</b>	≈ 44 <sup>e)</sup>	41,6- 42,6 <sup>r)</sup>		≥ 42,8 <sup>h)</sup> (gilt für fertigen Blend)		27,60 <sup>i)</sup>	17,5- 20,3 <sup>e)</sup>	19,9 <sup>r)</sup>	32,1-33,7 <sup>m),r)</sup> 37,5 <sup>n),r)</sup>	15,2 <sup>j)</sup>	15,2 <sup>j)</sup>	50 <sup>p)</sup>	120 <sup>p)</sup>
<b>H<sub>u</sub> (MJ/l)</b>	33,7-35,6 <sup>r)</sup>	30-33 <sup>g)</sup>		31,2-33,0 <sup>r)</sup>		18,44 <sup>i)</sup>	19,5- 19,7 <sup>e)</sup>	15,8 <sup>g)</sup>	26-27 <sup>g),m)</sup> 31,1 <sup>g),n)</sup>	15,3 <sup>r)</sup>	14,7 <sup>r)</sup>	0,0398 <sup>p)</sup>	0,0108 <sup>p)</sup>

a) gemäß [DIN EN 15940] für paraffinischen Dieselmotorkraftstoff und [DIN EN 590] für Dieselmotorkraftstoff

b) aus: GESTIS-Stoffdatenbank [Gestis]

c) gemäß [DIN EN 15940] für paraffinischen Dieselmotorkraftstoff

d) Dichte für Standarddieselmotorkraftstoff gemäß [DIN EN 590] als Vergleich

e) aus: [Schemme et al. 2017]

f) gemäß [DIN EN 228] für Ottomotorkraftstoff

g) aus: [Sarathy et al. 2014]

h) gemäß [ASTM D7566], Annex 1

i) gemäß [ISO 16861]

j) aus: [Blochum et al. 2021]

k) gemäß [ASTM D7862]

l) Temperatur in [ASTM D7862] nicht angegeben

m) für die C<sub>4</sub>-Alkohole 1-Butanol, 2-Butanol und Iso-Butanol

n) für 1-Oktanol (Dichte ist für 20 °C angegeben)

o) Eigenschaften für Wasserstoff nur relevant für Hythane (= Mischungen mit Methan)

p) aus: [RP Photonics 2022]

q) per Definition

r) berechnet



**Tabelle 2-11:** Definition der Drop-In-Fähigkeit von synthetischen Kraftstoffen und Kraftstoffblends für Kraftstoffe des bodengebundenen Verkehrs; gilt analog auch für die Schifffahrt und synthetische Treibstoffe der Luftfahrt

Bezeichnung	Beschreibung
<b>Drop-In+</b>	- Als Reinkraftstoff rückwärtskompatibel mit Bestandsfahrzeugen - Konform mit geltenden Normen
<b>Drop-In</b>	- Als Reinkraftstoff rückwärtskompatibel mit Bestandsfahrzeugen - Nicht konform mit geltenden Normen
<b>Drop-In+ (Blend)</b>	- Als Blendkomponente rückwärtskompatibel mit Bestandsfahrzeugen - Konform mit geltenden Normen
<b>Drop-In (Blend)</b>	- Als Blendkomponente rückwärtskompatibel mit Bestandsfahrzeugen - Nicht konform mit geltenden Normen
<b>Near-Drop-In</b>	- Nicht rückwärtskompatibel mit Bestandsfahrzeugen - Einsatz nach Umrüstung mit vertretbarem Aufwand möglich
<b>Non-Drop-In</b>	- Nicht rückwärtskompatibel mit Bestandsfahrzeugen - Umrüstung nicht möglich / nicht sinnvoll

Im Folgenden wird eine Übersicht zu den beforschten Kraftstoffen je Sektor gegeben. Eine nähere Einordnung der beforschten Kraftstoffe hinsichtlich ihrer Systemkompatibilität erfolgt im Rahmen separater veröffentlichter Kraftstoffsteckbriefe [DECHEMA 2023] anhand geltender kraftstoffseitiger sowie technischer Anforderungen für unterschiedliche Anwendungsfelder. Dies umfasst die Prüfung, ob die beforschten Kraftstoffe oder Kraftstoffkomponenten

- bereits in der **REACH**-Datenbank der Europäischen Chemikalienagentur (ECHA) registriert sind,
- bestehende **Normen** erfüllen, Anpassungen der bestehenden Normen erfordern oder der Entwicklung neuer Normen bedürfen und wie weit diese ggf. bereits fortgeschritten sind,
- kompatibel mit **(inter-)nationalen Regularien und Verordnungen** (z.B. RED II, FQD, BImSchG, EnergieStG, BImSchV) sind,
- eine hohe Materialverträglichkeit (u.a. Wechselwirkungen mit Polymeren oder metallischen Werkstoffen) in konventionellen Motorenkonzepten aufweisen,
- vergleichbare Eigenschaften zu konventionellen Kraftstoffen (**Performance**, „**fit for purpose**“) aufweisen und somit als Drop-In-Kraftstoff in das bestehende System integrierbar sind (u.a. Infrastruktur, Tankstellen, Motorenkonzepte etc.),

- einen positiven (oder ggf. negativen) Impact bzgl. **regulierter und nicht-regulierter Emissionen** im Rahmen des Verbrennungsprozesses haben, und wie groß dieser Impact eingeschätzt wird.

Dabei muss auch der Sachlage Rechnung getragen werden, dass sich unterschiedliche Kraftstoffe gegenwärtig in unterschiedlichen Stadien des Normbildungsprozesses befinden. So wurden bereits Arbeitsausschüsse für die Entwicklung von Normen für einige Kraftstoffe (DME, OME) gegründet – hier existieren bereits „Vornormen“ (DIN TS) oder sind Vornormen bereits im fortgeschrittenen Stadium. Andere Kraftstoffe sind z.T. weitestgehend kompatibel mit bestehenden Normen (MtG-Ottokraftstoff, FT-Diesel bzw. -Kerosin, Methan, Wasserstoff), wohingegen es für mehrere Kraftstoffe, insbesondere Alkohole und deren Derivate sowie Ammoniak, aktuell noch keine konkreten Normungsvorhaben gibt.

Innerhalb der Kraftstoffsteckbriefe [DECHEMA 2023] erfolgt auch eine allgemeine **Einordnung synthetischer Kraftstoffe in den Kontext von Regularien und Verordnungen**. Da diese v.a. bzgl. der aktuellen Gesetzgebung im Rahmen von BEniVer nicht mit der gleichen Detailtiefe betrachtet wurden, ist nachfolgend ein Auszug aus den Steckbriefen aufgeführt:

„Die Kraftstoffqualitätsrichtlinie (*Fuel Quality Directive*, FQD) regelt die Qualität von Otto-, Diesel- und Gasölkraftstoffen, die in der EU in Verkehr gebracht werden dürfen [EU 98/70/EG]. Sie bezieht sich auf einen festgelegten Satz von Parametern, der für jedes Produkt definiert ist und an denen sich die Kraftstoffnormen orientieren müssen. Wasserstoff, Erdgas bzw. Methan, Brennstoffe für die seegehende Schifffahrt und Flugtreibstoffe, welche bereits als Kraftstoffe in Europa etabliert sind, werden hier nicht adressiert. In Deutschland sind die zugelassenen Kraftstoffe für den straßengebundenen Verkehr in der 10. BImSchV gelistet. Im Gegensatz zur Regelung in vielen anderen EU-Mitgliedsstaaten werden hier explizit Normen aufgeführt und Kraftstoffe müssen alle hier geforderten Parameter einhalten, um in Deutschland in Verkehr gebracht werden zu dürfen. Im Falle eines Flugtreibstoffes ist die Zertifizierung und Zulassung durch die ASTM international anerkannt und somit weltweit gültig. Daher darf ein zugelassener Treibstoff an Flughäfen weltweit vertankt werden, ohne dass dieser in nationalen Verordnungen wie bspw. der BImSchV aufgeführt werden muss.

Im Rahmen der *Renewable Energy Directive* (RED II) [EU 2018/2001], welche den Rahmen zur Nutzung von Energie aus erneuerbaren Quellen definiert, sind strombasierte Kraftstoffe als RFNBO (*renewable fuels of non-biological origin*)<sup>2</sup> anrechnungsfähig. In der deutschen Gesetzgebung sind strombasierte Kraftstoffe als Erfüllungsoption auf die Verpflichtung zur THG-Minderung zurzeit mit dem zweifachen ihres Energiegehaltes anrechenbar. Laut finalem Entwurf der EU-Kommission zur RED III vom 14. Juli 2021 [EU 2021/0218] soll eine Quote für RFNBOs für den Industriesektor zur energetischen und nicht-energetischen Nutzung eingeführt werden. Für den Transportsektor wird eine Unterquote für RFNBOs von 2,6 % in 2030 vorgeschlagen. Im Entwurf der RED III sind Multiplikatoren nur noch für den Einsatz im Flug- und Schifffahrtssektor (1,2-fach) vorgesehen. Hinsichtlich der Einführung strombasierter Flugtreibstoffe werden in der RED III keine Ziele genannt.

---

<sup>2</sup> Beinhaltet alle Kraftstoffe, die keine Biokraftstoffe oder Biogas sind, und deren Energiegehalt aus anderen erneuerbaren Quellen als Biomasse stammt.

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

Im Verordnungsentwurf zur RefuelEU Aviation (Stand 04/23) [European Parliament 2023] wird vorgeschlagen, dass ab 2025 mindestens 2 % nachhaltig produzierte Treibstoffe (SAF – Sustainable Aviation Fuels) in der Luftfahrt eingesetzt werden sollen. Diese Anteile sollen bis 2050 auf mindestens 70 % SAF erhöht werden. Ab 2030 soll der Anteil synthetischer, d.h. strombasierter Kraftstoffe, bei 1,2 % der mindestens 6 % eingesetzten SAF liegen, ab 2050 sollen die strombasierten SAF dann einen Anteil in Höhe von 35 % einnehmen. Mitglieder des EU-Parlaments haben dafür votiert, den Mindestanteil erneuerbarer Kraftstoffe auf EU-Flughäfen deutlich zu erhöhen [EU 2021/0205-07/07/2022]. Die Trilogverhandlungen zwischen EU-Kommission, EU-Parlament und EU-Rat hierzu sind jedoch noch nicht abgeschlossen. In Deutschland ist bereits heute eine Unterquote im Bundes-Immissionsschutzgesetz (BImSchG) §37a verankert, wonach ab 2026 der Anteil strombasierten Kerosins (bzw. „Flugturbinenkraftstoff aus erneuerbaren Energien nicht-biogenen Ursprungs“) bei 0,5 % liegen soll. Dieser Anteil soll 2028 auf 1 % und 2030 auf 2 % erhöht werden.“

### **2.7.2 Strombasierte Kraftstoffe für die Anwendung im Straßenverkehr**

Abgesehen von synthetischem Kerosin sind alle in der Tabelle 2-9 genannten synthetischen Kraftstoffe im Fokus für eine Anwendung im Straßenverkehr. Für ihren Einsatz müssen Beimischungsgrenzen, gemäß heutiger Normen, die 10. BImSchV als gesetzliche Grundlage, sowie technische Beimischungsgrenzen beachtet werden. Diese Kriterien kennzeichnen die sogenannte Drop-In-Fähigkeit der synthetischen Kraftstoffe. Tabelle 2-11 zeigt die Definition der verschiedenen Drop-In-Bezeichnungen, welche im Folgenden für die entsprechenden synthetischen Kraftstoffe und Kraftstoffblends verwendet werden.

Tabelle 2-12 gibt einen Überblick zu den Normen und gesetzlichen Beimischungsgrenzen der strombasierten Kraftstoffe, die durch die Verbände für die Anwendung im Straßenverkehr beforscht werden.

**Tabelle 2-12:** Übersicht zu den strombasierten Kraftstoffen für die Anwendung im Straßenverkehr und ihren Beimischungsgrenzen gemäß heutiger Normen

Kraftstoff (KS)	Norm (Bezeichnung)	Norm (Name)	Relevante Norm für Beimischung (Bezeichnung)	Genormter KS	Max. Beimischungsanteil
<b>Paraffinischer Diesel (FT-Diesel)</b>	DIN EN 15940:2019-10 <sup>3</sup>	Kraftstoffe - Paraffinischer Dieselmotorkraftstoff aus Synthese oder Hydrierungsverfahren - Anforderungen und Prüfverfahren	DIN EN 590	Diesel	ca. 26 % <sup>4</sup>
<b>FT-Benzin</b>	Nicht vorhanden	n.a.	DIN EN 228	Benzin	100 %
<b>MtG</b>	Nicht vorhanden	n.a.	DIN EN 228	Benzin	90 %
<b>MtG E10</b>	Nicht vorhanden	n.a.	DIN EN 228	Benzin	100 %
<b>Methan</b>	DIN EN 16723-2 (Tabelle Anhang D)	Erdgas und Biomethan zur Verwendung im Transportwesen und Biomethan zur Einspeisung ins Erdgasnetz - Teil 2: Festlegungen für Kraftstoffe für Kraftfahrzeuge	n.a.	Erdgas / Biomethan	100 %
<b>1-Oktanol</b>	Nicht vorhanden	n.a.	DIN EN 590	Diesel	0 %
<b>2-Butanol</b>	Nicht vorhanden	n.a.	DIN EN 228	Benzin	bis 15 %
<b>Dimethylcarbonat (DMC)</b>	Nicht vorhanden	n.a.	DIN EN 228	Benzin	0 %
<b>Methylformiat</b>	Nicht vorhanden	n.a.	DIN EN 228	Benzin	bis 5 % <sup>5</sup>
<b>Dimethylether (DME)</b>	DIN/TS 51698 (in Bearbeitung)	Kraft- und Brennstoffe - Anforderungen - Dimethylether (DME)	DIN EN 590 (bzw. DIN EN 589)	Diesel (bzw. LPG)	0 %
<b>Polyoxymethylendimethylether (OME)</b>	DIN/TS 51699 (in Bearbeitung)	Kraft- und Brennstoffe – Polyoxymethylendimethylether (OME) – Anforderungen und Prüfverfahren	DIN EN 590	Diesel	0 %
<b>Methanol</b>	Normungsprojekt zurzeit beim DIN-FAM in der Abstimmung	n.a.	DIN EN 228	Benzin	3 %
<b>Wasserstoff (Nutzung in Brennstoffzellenfahrzeugen)</b>	DIN EN 17124	Wasserstoff als Kraftstoffproduktfestlegung und Qualitätssicherung – Protonenaustauschmembran (PEM)-Brennstoffzellenanwendungen für Straßenfahrzeuge	n.a.	n.a.	100 %
<b>Wasserstoff (Nutzung in Erdgas-Fahrzeugen)</b>	Nicht vorhanden	n.a.	DIN EN 16723-2 (Tabelle Anhang D)	Erdgas	2 %

<sup>3</sup> Da die Norm DIN EN 15940 nicht in der 10. BImSchV aufgeführt ist, darf synthetischer Diesel als Reinstoff nicht an öffentlichen Tankstellen angeboten werden.

<sup>4</sup> Unter Berücksichtigung von 7 % Biodiesel [DIN EN 14214] und je nach Kraftstoffdichte. Bei größeren FT-Diesel Anteilen wird die in der DIN EN 590 festgeschriebene Dichte nicht mehr eingehalten [DECHEMA 2023].

<sup>5</sup> Abhängig vom maximalen Sauerstoffgehalt des Ottokraftstoffs. Bis zu 5 % Methylformiat im Kraftstoff möglich, sofern Ethanol-Anteil bei 0 %.

**Paraffinischer Diesel:** Die relevante Norm EN 590 schreibt keine Limitierung für Beimischungsmengen vor. Ausschlaggebend ist die Erfüllung der vorgeschriebenen Anforderungen an den Kraftstoff. Da sich die chemischen Eigenschaften von paraffinischem Diesel je nach Herstellungsprozess unterscheiden, kann keine allgemeingültige Aussage zur maximalen Beimischungsgrenze getroffen werden. Heute gibt es vor allem Erfahrungswerte bezüglich der Beimischung von HVO mit Diesel. Dort liegt die maximale Quote bei ca. 30-35 %, was als Richtwert für andere paraffinische Kraftstoffe herangezogen werden kann [Kramer 2022]. NormAKraft nimmt für synthetischen Diesel die Grenze bei 26 % an. Da ab einem Anteil von 26 % paraffinischem Diesel plus die 7 % FAME-Biodiesel, die in der EN 590 festgeschriebene Dichte nicht mehr eingehalten werden kann [DECHEMA 2023]. Da die Norm DIN EN 15940 nicht in der 10. BImSchV aufgeführt ist, darf synthetischer Diesel als Reinstoff nicht an öffentlichen Tankstellen angeboten werden.

**FT-Benzin und MtG-Benzin:** Bei der Nutzung von FT-Benzin und MtG-Benzin bestehen keine expliziten Beschränkungen. Im Allgemeinen hängt die genaue Beimischungsmenge von den Kraftstoffeigenschaften ab. Pauschale Aussagen können deshalb nicht getroffen werden. Insofern die Eigenschaften nach Norm durch aufwändiges Upgrading im Rahmen des Postprocessing des FT-Rohprodukts eingehalten werden, kann bis zu 100 % FT-Benzin zum Einsatz kommen. Das Rohprodukt verfügt über eine zu geringe Klopfestigkeit. FT-Kraftstoffe sind überwiegend paraffinischer Natur und dürften ohne Nachbehandlung Probleme mit der Oktanzahl haben. Bei reinem MtG-Benzin wird die in der EN 228 festgelegte Oktanzahl ebenfalls nicht erreicht. Hier ist ein Zusatz von 10 % Ethanol allerdings ausreichend, damit der Kraftstoff die Norm erfüllt. D.h. als MtG E10 ist der Einsatz eines 100 % erneuerbaren Kraftstoffes möglich.

**Methan:** Synthetisches Methan entspricht der heutigen Norm DIN EN 16723-2 – Erdgas und Biomethan zur Verwendung im Transportwesen und Biomethan zur Einspeisung ins Erdgasnetz - Teil 2: Festlegungen für Kraftstoffe für Kraftfahrzeuge (siehe dort Tabelle D.1 im Anhang D) und ist demnach 100 % Drop-In-fähig.

**1-Oktanol:** 1-Oktanol ist kein reiner Kohlenwasserstoff und deshalb als Zumischungs-komponente nach heutiger Norm EN 590 nicht zulässig. Bei 1-Oktanol handelt es sich um eine reine chemische Verbindung. Insofern ist der Bedarf für eine eigene Kraftstoffnorm, ungeachtet ihres Potenzials als Kraftstoffkomponente, momentan nicht gegeben.

**2-Butanol:** Der maximale Beimischungsanteil von 2-Butanol ist bei den Normen für E5 und E10 auch bzw. ausschließlich durch den zulässigen Gesamtsauerstoffgehalt begrenzt, der 2,7 %<sub>w</sub> (E5) bzw. 3,7 %<sub>w</sub> (E10) beträgt. Für E10 ist ebenfalls eine konkrete Beimischungsgrenze in der Norm festgelegt (15%). Die E5-Norm legt keine explizite Obergrenze fest. Die mögliche Beimischung ist auch durch die Dichte des Benzinanteils bestimmt. Grundsätzlich würde bei Einhaltung der zulässigen Beimischungsmenge der Sauerstoffgehalt eingehalten; häufig werden aber mehrere sauerstoffhaltige Komponenten zugesetzt, dann kann es in dieser Hinsicht problematisch werden.

**Dimethylcarbonat (DMC) und Methylformiat (Mefo):** Ester können nach heutiger Norm Diesel- oder Ottokraftstoffen nicht beigemischt werden. Bisherige Untersuchungen fokussieren auf DMC/Mefo-Gemische oder DMC/Benzin.

**Dimethylether (DME):** Die Beimischung von DME zu Diesel ist nach heutiger Norm EN 590 nicht zulässig. DME wurde auch schon in Untersuchungen als Beimischung mit Liquified Petroleum Gas (LPG) (in Dieselmotoren) betrachtet. Die für LPG relevante Norm (DIN EN 589) lässt jedoch nur Gemische aus Propan, Propen, Butan, Butanisomeren und Spuren anderer Kohlenwasserstoffe zu, sie sind für den Einsatz in speziell dafür ausgelegten (Otto-) Motoren entwickelt. DME-Beimischungen sind somit aus beiden Gründen nicht relevant. Momentan ist die Norm für DME in Bearbeitung (DIN/TS 51698). Die ISO 16861 dient als Basis für die DIN; es hat sich gezeigt, dass die ISO aber zur Beschreibung der Anforderungen für Fahrzeuge nicht ausreicht.

**Polyoxymethyldimethylether (OME):** Bei einer OME-Kraftstoffkomponente handelt es sich um eine Mischung aus verschiedenen OME-Molekülen, die sich in ihrer Kettenlänge unterscheiden. Üblicherweise werden diese als OME<sub>3-5</sub> geschrieben, wobei der Index „3-5“ für die unterschiedlichen Kettenlängen steht und angibt, dass als Hauptkomponenten OME<sub>3</sub>, OME<sub>4</sub> und OME<sub>5</sub> enthalten sind. Daneben gibt es noch kleinere und größere OME-Komponenten. Da im Rahmen von BENiVer stets die Mischung OME<sub>3-5</sub> für die Anwendung im Verbrennungsmotor untersucht wurde, steht OME hier gleichbedeutend für OME<sub>3-5</sub>. Da es sich nicht um einen reinen Kohlenwasserstoff handelt, ist die Nutzung als Zumischungskomponente nach heutiger Norm nicht zulässig. Momentan ist die Norm für OME in Bearbeitung (DIN/TS 51699).

**Methanol:** Gemäß EN 228 kann Benzin lediglich 3 % Methanol enthalten. Momentan gibt es keine Norm für Methanol für die Nutzung als Kraftstoff in Verbrennungsmotoren. Zurzeit befindet sich allerdings ein Normungsprojekt beim DIN-FAM in der Abstimmung. Für die internationale Standardisierung von Methanol ist der Produktstandard "Methanol Reference Specifications" der International Methanol Producers and Consumers Association (IMPCA) von größter Bedeutung.

**Wasserstoff:** Gemäß heutiger Norm kann Wasserstoff lediglich 2 % zu Erdgas beigemischt werden und von CNG-Fahrzeugen getankt werden. Eine Norm für Wasserstoff (als Kraftstoff) existiert heute nur für die Anwendung in Brennstoffzellen-Fahrzeugen (EN 17124 - Wasserstoff als Kraftstoff - Produktfestlegung und Qualitätssicherung – Protonenaustauschmembran (PEM)-Brennstoffzellenanwendungen für Straßenfahrzeuge).

Der Einsatz synthetischer Kraftstoffe in heutigen (bereits zugelassenen) Fahrzeugen ist innerhalb der normativen Beimischungsgrenzen gesetzlich geregelt. Technisch wären allerdings teilweise auch höhere Beimischungsraten möglich. Beispielsweise wird bis zu 15 % Methanol in Benzin (M15) als zumischfähig bewertet [Wouters et al. 2020]. Allerdings sind aktuelle Fahrzeuge nur für die genormten Kraftstoffe freigegeben und eine abweichende Kraftstoffzusammensetzung hätte einen erheblichen zusätzlichen Absicherungsbedarf zur Folge. Es ist äußerst fraglich, ob die Fahrzeughersteller dies für bereits verkaufte Fahrzeuge nachträglich durchführen würden. Ferner müssten inkompatible Fahrzeuge weiterhin eine Schutzsorte tanken können. Die Akzeptanz der Bevölkerung ist ebenfalls ein Faktor, welcher den Einsatz neuartiger Kraftstoffsorten erschwert. So wird seit der Einführung des E10 Kraftstoffes in Deutschland im Jahr 2011 trotz Kostenvorteilen und beinahe hundertprozentiger Flottenverträglichkeit noch immer nur ein Anteil von 14 % E10 Kraftstoff getankt [Kroher 2022].

Zur Reduktion der CO<sub>2</sub>-Emissionen der Bestandsflotte sind im Straßenverkehr somit synthetische Kraftstoffe notwendig, welche den gesetzlichen Normen entsprechen. FT-Benzin und MtG erfüllen, abhängig vom Upgrading, die Norm DIN EN 228 und sind deshalb kompatibel mit heutigen Fahrzeugen. Diesel-Fahrzeuge, welche bereits explizit für DIN EN 15940 paraffinischen Diesel freigegeben sind, können ebenfalls bereits heute mit 100 % FT-Diesel oder HVO betrieben werden (z.B. alle Volkswagen Dieselfahrzeuge ab KW25/21 [Volkswagen 2021], Ford Modelle ab Modelljahr 2019 [Kramer 2022], ausgewählte Mercedes-Fahrzeuge [Dorling 2016], allerdings noch nicht in Deutschland, da die DIN EN 15940 nicht in der 10. BImSchV aufgeführt ist).

### **2.7.3 Strombasierte Kraftstoffe für die Anwendung in der Luftfahrt**

Die Tabelle 2-9 zeigt, dass im Rahmen der Energiewende im Verkehr gegenwärtig zwei verschiedene strombasierte, synthetische Kerosin-Alternativen untersucht werden: **Fischer-Tropsch-Kerosin** und **Methanol-to-Jet (MtJ)**. Die in Tabelle 2-10 angegebenen Eigenschaften entstammen dem Anhang der ASTM-Norm D7566-20c [ASTM D7566] und sind dort explizit für das FT-Kerosin angegeben. Da das MtJ noch nicht zertifiziert ist, wurden in der Tabelle 2-10 keine Angaben dazu gemacht, jedoch müssen die Eigenschaften des MtJ für eine erfolgreiche Zertifizierung in den gleichen Bereichen liegen, wie diese auch für das FT-Kerosin angegeben sind. Im Gegensatz zu den möglichen alternativen Kraftstoffen im Straßenverkehr oder der Schifffahrt, kommen für die Anwendung in der Luftfahrt keine oxygenierten Kraftstoffe (= Kraftstoffe, die Sauerstoff in der Molekülstruktur enthalten) in Frage. In Tabelle 2-13 sind die beiden beforschten Treibstoff-Alternativen hinsichtlich ihrer möglichen Beimischungsanteile und der Zusammensetzung gegenübergestellt. Ergänzt ist die Tabelle um ein **100 % SAF-Kerosin**, welches als Referenzpfad mit betrachtet wird.

Bislang sind nur Treibstoffblends für den Einsatz zugelassen, die entsprechend der zugrunde liegenden international gültigen Norm ASTM D7566 einen synthetischen Anteil von max. 50 %<sub>Vol</sub> aufweisen [ASTM D7566]. In der ASTM D7566 sind bis heute (Juni 2023) sieben verschiedene synthetische Treibstoffe (auch SAF = Sustainable Aviation Fuels genannt) gelistet, die entsprechend der Anforderung an die Zertifizierung in einem 50%-Blend mit rohölbasierendem Kerosin (Jet A-1) die gleichen Eigenschaften wie reines Jet A-1 aufweisen. Wie bereits erwähnt, gehört das FT-Kerosin zu diesen zertifizierten SAF, das MtJ hingegen (noch) nicht. Zwar gibt es bereits ein auf Alkoholen basierendes, zertifiziertes SAF (namentlich AtJ-SPK = Alcohol to Jet – Synthetic Paraffinic Kerosene), jedoch sind hier auch die Alkohole definiert, die für dessen Produktion verwendet werden können. Konkret sind das momentan nur Ethanol (C<sub>2</sub>H<sub>5</sub>OH) und iso-Butanol (i-C<sub>4</sub>H<sub>9</sub>OH). Für eine Zulassung des MtJ wird angestrebt, die Zertifizierung des AtJ-SPK um Methanol als zulässigen Ausgangsstoff zu erweitern und so ein verkürztes Zulassungsverfahren zu durchlaufen.

**Tabelle 2-13:** Übersicht zu den strombasierten Treibstoffen für die Luftfahrt und deren Beimischungsgrenzen (SAF = Sustainable Aviation Fuel, SPK = Synthetic Paraffinic Kerosene)

Treibstoff (ASTM-Bezeichnung)	Max. Beimischungsanteil			Zusammensetzung	Drop-In Fähigkeit
	lt. ASTM D7566	Techn. mgl. ohne Anpassung	Techn. mgl. mit Anpassung		
<b>Fischer-Tropsch-Kerosin</b> (FT-SPK)	50 %	> 50 %	100 %	n- und iso-Paraffine (mehr n- als iso-Paraffine)	Drop-In+ (Blend)
<b>Methanol-to-Jet</b> (MtJ)	0 %	> 50 %	100 %	überwiegend iso-Paraffine	Drop-In (Blend)
<b>100 % SAF</b>	0 %	100 %	100 %	paraffinisch (SPK)	Drop-In

Trotz der momentan vorhandenen Zulassungsvoraussetzung für SAF sind auch erste aromatenfreie, d.h. rein paraffinische, Treibstoffe in der Erprobung und wurden bereits in Testflügen eingesetzt [Airbus 2021b].

#### **2.7.4 Strombasierte Kraftstoffe für die Anwendung in der Schifffahrt**

In der Schifffahrt sind grundlegend drei unterschiedliche Arten von Kraftstoffen etabliert: Schiffsdiesel (Marine Gas Oil / MGO), Schweröl (Heavy Fuel Oil / HFO) und Erdgas. Die flüssigen Kraftstoffe MGO und HFO nehmen dabei allerdings einen Anteil von etwa 97 % ein. Als alternative, strombasierte Kraftstoffe für den Einsatz in der Schifffahrt werden im Rahmen der Energiewende im Verkehr **synthetischer Diesel**, **Methanol (CH<sub>3</sub>OH)** und **Oxymethylenether (OME)<sup>6</sup>** als Ersatz für den konventionellen Schiffsdiesel (und auch Schweröl) beforscht. Für Erdgas, welches in Form von LNG (Liquified Natural Gas) in der Schifffahrt verwendet wird, dient synthetisches LNG, was von der Zusammensetzung her synthetischem Methan entspricht, als Alternative. Da der Methangehalt im Erdgas je nach Herkunft bei 80-98 % liegt [Geldsetzer et al. 2020; Spektrum 2001], wird erwartet, dass der Ersatz mit rein synthetischem Methan bei der Anwendung in Gasmotoren problemlos möglich ist. Eine Übersicht zu den verschiedenen Kraftstoff-Alternativen ist in Tabelle 2-14 gegeben. Dort sind der Vollständigkeit halber auch **Ammoniak** und **Wasserstoff** aufgeführt. Diese werden zwar nicht im Rahmen der spezifischen Verbundpfade betrachtet, sind als alternative Schifffahrtsantriebe grundsätzlich aber auch Gegenstand laufender Forschungsarbeiten. Ammoniak wurde im späteren Verlauf des Projektes BEniVer als generischer Kraftstoffpfad aufgenommen.

Der Tabelle 2-14 ist zu entnehmen, dass synthetischer Schiffsdiesel (FT-Diesel), welcher der bestehenden Norm für Schiffsdiesel DIN ISO 8217 entspricht, direkt als Drop-In-Kraftstoff verwendet werden kann. Dies gilt insbesondere für den Ersatz des MGO. Aber auch in Schwerölmotoren kann dieser eingesetzt werden, nur sind hier voraussichtlich Anpassungen an der Motorsteuerung notwendig. Für den Einsatz von reinem Methanol als Schifffahrtskraftstoff sind hingegen neue Motorenkonzepte notwendig. Hier gibt es allerdings bereits entsprechend aus-

<sup>6</sup> Analog zur Nutzung im Straßenverkehr (siehe Kapitel 2.7.2) bedeutet auch in Zusammenhang mit der Schifffahrt die Nennung von OME, dass OME<sub>3-5</sub> gemeint ist.



gerüstete Schiffe auf dem Markt [Tagesschau 2021], sodass die Forschung hier vor allem dahin geht, die bestehende Technologie weiterzuentwickeln und zu optimieren. Der Einsatz von OME beschränkt sich auf Anwendung als Blendkomponente für Schiffsdiesel. Bis zu welchen Anteilen OME mit (einfachen) Umrüstungen beigemischt werden kann, ist nicht bekannt. Für den Einsatz von Mischungen mit >15 % sind aber Anpassungen an Materialien, z.B. von Dichtungen, vorzunehmen. Neue Untersuchungsergebnisse zur Materialverträglichkeit von OME werden in den Kraftstoffsteckbriefen des Projektes NormAKraft gezeigt. Zwar mit dem Schwerpunkt für die Anwendung im Straßenverkehr [DECHEMA 2023]; die Erkenntnisse hieraus lassen sich jedoch auch auf den Schiffsverkehr übertragen.

**Tabelle 2-14:** Übersicht zu den strombasierten Kraftstoffen in der Schifffahrt und deren Beimischungsgrenzen

Kraftstoff	Art der Anwendung	Relevante Norm für Anwendung	Beimischungsgrenze gemäß Norm	Technische Beimischungsgrenzen			Neuentwicklung für Reinkraftstoff	Drop-In-Fähigkeit	Kommentar
				ohne Anpassung	Anpassung Motorsteuerung	Umrüstung			
<b>Paraffin-Diesel (FT-Diesel)</b>	Ersatz für MGO und HFO	ISO 8217 Anforderungen an Schifffahrtsbrennstoffe	bis 100 %	nicht bekannt	100 %	nicht notwendig	nicht notwendig	Drop-In+	FT-Diesel für Schifffahrt mit höherer C-Zahl als für Straße
<b>Methan (syn. LNG)</b>	Ersatz für fossiles LNG	DIN EN ISO 20519 Bunkern Flüssigerdgasbetriebener Schiffe DIN EN ISO 16903 Eigenschaften Flüssigerdgas	100 %	bis zu 100 %	100 %	nicht notwendig	nicht notwendig	Drop-In+ für LNG-Schiffe	Ggf. Anpassung Motorsteuerung (Methan ≠ LNG → Zündeigenschaften)
<b>OME</b>	Beimischung zu Diesel	ISO 8217 Anforderungen an Schifffahrtsbrennstoffe	0 %	einstelliger %-Bereich	nicht bekannt		nicht bekannt	Near-Drop-In	Anteile orientieren sich an Anwendung Straße
<b>Methanol</b>	Neuer Kraftstoff	nicht vorhanden	Keine Beimischung, Einsatz erfolgt als Reinkraftstoff (Konzepte bereits entwickelt)				<ul style="list-style-type: none"> <li>• Erste Schiffe bereits eingesetzt</li> <li>• Retrofit möglich</li> </ul>	Non-Drop-In	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Einzelzulassung nötig</li> <li>• auch Anwendung in Brennstoffzelle möglich</li> </ul>
<b>Wasserstoff</b>	Gasmotor	EN 16723-2 Erdgas und Biomethan im Transport; Biomethan zur Einspeisung	2 %	bis zu 20 % (sofern H <sub>2</sub> -Tank vorhanden)	> 20 % (ggf. > 30 %)	> 30 % (wg. Explosionsschutz) [Auer 2022]	<ul style="list-style-type: none"> <li>• in Erprobung</li> <li>• Retrofit LNG-Motoren</li> </ul>	Near-Drop-In, Drop-In (Blend), wenn H <sub>2</sub> -Tank vorhanden	Anteile beziehen sich auf Anwendung in Gasmotor
	Brennstoffzelle	nicht vorhanden	Keine Beimischung, Einsatz erfolgt als Reinkraftstoff (Konzepte bereits entwickelt)				erste Anwendung bekannt		Norm bislang nur für Anwendung Straße
<b>Ammoniak</b>	Gasmotor	nicht vorhanden	Nicht bekannt, Gegenstand der Forschung				in Entwicklung	Non-Drop-In	
	Brennstoffzelle	nicht vorhanden	Keine Beimischung, Einsatz erfolgt als Reinkraftstoff				in Entwicklung		

### **2.7.5 Strombasierte Kraftstoffe für die Anwendung in der Rückverstromung**

Für den Einsatz strombasierter Brennstoffe im Bereich der Energiegewinnung kommen sowohl reines **synthetisches Methan** als auch eine **Mischung aus Methan (CH<sub>4</sub>) und Wasserstoff (H<sub>2</sub>)** (= Hythan) in Frage. Analog zur Betrachtung im Bereich der Schifffahrt kann erwartet werden, dass Erdgas problemlos durch synthetisches Methan bei der Verbrennung in Gasturbinen ersetzt werden kann. Hinsichtlich der Anwendung einer Mischung mit Wasserstoff ist derzeit Erdgas mit einem H<sub>2</sub>-Anteil von bis zu 5 %<sub>Vol</sub> einsetzbar, bei moderneren Anlagen sind es sogar bis zu 15 %<sub>Vol</sub> [DIN EN 16723-2]. Bei einem höheren Wasserstoffanteil (betrachtet werden 20 % bis 30 %) müssen, wegen der Gefahr der Wasserstoffversprödung und dem damit einhergehenden anzupassendem Druck, Anpassungen an Materialien und dem Brennkammersystem vorgenommen werden. Hinsichtlich der Verbrennung selbst ist aber ein Wasserstoffanteil von bis zu 30 % im Kraftwerksbereich problemlos möglich [Auer 2022]. Bei über 30 % Wasserstoff in der Brennstoffmischung sind Änderungen beim Explosionsschutz notwendig.

Über die Betrachtungen in BEniVer hinausgehend zeigt sich auch die Möglichkeit der Nutzung von **reinem Wasserstoff** in BHKW-Konzepten. Hierzu gibt es bereits vielversprechende Forschungsergebnisse, die die Einsatzfähigkeit zeigen. Ein Vorteil der Anwendung von reinem Wasserstoff liegt v.a. in der vollständigen Vermeidung von CO<sub>2</sub>- und anderer C-haltiger Emissionen [Prunnbauer 2022].

### 3 Kriterien für die ganzheitliche Bewertung der Kraftstoffpfade

Auf Basis der umfangreichen wissenschaftlichen Analysen (Kap. 2.7) und der zuvor festgelegten Kraftstoffpfade und Rahmenannahmen (Kap. 2) können die Pfade ganzheitlich hinsichtlich technischer, ökologischer, ökonomischer und gesellschaftlicher Kriterien bewertet werden.

Die Kraftstoffpfade werden nach 30 verschiedenen Kriterien qualitativ bewertet. Die Bewertung eines jeden Kriteriums erfolgt jeweils anhand einer Skala von „+4“ bis „-4“, wobei sich je nach Bewertungskriterium unterschiedliche Definitionen für eine „+4“ oder „-4“ ergeben. Die Bewertung erfolgt absolut und vergleichend über alle Kraftstoffe hinweg. D.h. wenn ein Kraftstoff eine „+4“ erhält, dann hat er für dieses Kriterium die besten Eigenschaften, bei einer „-4“ ist er am schlechtesten. Dazwischen wird abgestuft, wobei sich bei einer „0“ die Vor- und Nachteile des Kraftstoffes innerhalb eines Bewertungskriteriums ausgleichen.

Die Bewertung erfolgt teilweise linear und teilweise nicht-linear.

Es gilt auch zu beachten, dass nicht ein Bewertungskriterium direkt bewertet wird, sondern sich dessen Bewertung aus dem gewichteten Mittelwert von unterschiedlichen Indikatoren ergibt. Diesen Indikatoren liegen, soweit möglich, wissenschaftliche Analysen und quantitative Maßstäbe zu Grunde. Im Folgenden ist für jedes Bewertungskriterium beschrieben, welche Indikatoren der Bewertung zu Grunde liegen und mit welcher Wichtung diese ggf. in die Gesamtbewertung eingehen.

**Tabelle 3-1:** Übersicht der Bewertungskriterien

Bewertungskategorie		Bewertungskriterium	
1	Integration ins Energiesystem	1	Differenzkosten des Energiesystems
		2	Strukturelle Veränderung des Energiesystems
		3	Ausgenutzte Ressourcenpotenziale
2	Techno-ökonomische Bewertung der Herstellung	1	Effizienz der Herstellung
		2	Kosten im Jahr 2018
		3	Kosten im Jahr 2030
		4	Kosten im Jahr 2045
		5	Flexibilisierungsoptionen
3	Kraftstoffnutzung	1	Umwelteigenschaften
		2	Energieinhalt
		3	Sicherheit und Handhabung (inkl. Haltbarkeit und Lagerfähigkeit)
		4	Kompatibilität im relevanten Sektor hinsichtlich Normen / Regularien
		5	Kompatibilität im relevanten Sektor hinsichtlich Technik
4	Integration ins Verkehrssystem	1	Kosten der Fahrzeughaltung
		2	Tankvorgang
		3	Tankinfrastruktur
5	Ökologische Bewertung	1	THG-Emissionen 2018
		2	THG-Emissionen 2030
		3	THG-Emissionen 2045
		4	Kumulierter Energieaufwand 2018
		5	Kumulierter Energieaufwand 2030
		6	Kumulierter Energieaufwand 2045
		7	Ursprung des verwendeten CO <sub>2</sub>
6	Akzeptanz	1	Kosten / Nutzen
		2	Umweltwirkungen
		3	Anwendungstauglichkeit
7	Markteinführung	1	Wie sinnvoll sind Markteinführungsmechanismen (MEM) aus ökologisch-systemischer Sicht?
		2	Kann aus nachfrageseitiger Sicht auf MEM verzichtet werden?
		3	Kann aus angebotsseitiger Sicht auf einen MEM verzichtet werden?

Tabelle 3-2: Qualitative Beschreibung der Bewertungsmetrik

		+4	+3	+2	+1	0	-1	-2	-3	-4
Integration ins Energiesystem	Differenzkosten des Energiesystems	Minimale Investitions- und Betriebskosten im Vergleich zu System ohne SynFuel-Herstellung				Mittlere Investitions- und Betriebskosten im Vergleich zu System ohne SynFuel-Herstellung				Maximale Investitions- und Betriebskosten im Vergleich zu System ohne SynFuel-Herstellung
	Strukturelle Veränderung des Energiesystems	Minimale neu installierte EE, Übertragung und Speicher				Mittlere neu installierte EE, Übertragung und Speicher				Maximaler Zubau an neu installierter EE, Übertragung und Speicher
	Ausgenutzte Ressourcenpotenziale	Minimaler Ausbau und Importbedarf				Mittlerer Ausbau und Importbedarf / installierbare Leistung zur Hälfte ausgeschöpft				maximaler Ausbau und Importbedarf / installierbare Leistung vollständig ausgeschöpft
Techno-ökonomische Bewertung der Herstellung	Effizienz der Herstellung	Höchste Effizienz und Kohlenstoffausbeute		Hohe Effizienz und Kohlenstoffausbeute		Moderate Effizienz und Kohlenstoffausbeute		Geringe Effizienz und Kohlenstoffausbeute		Sehr geringe Effizienz und Kohlenstoffausbeute
	Kosten in den Jahren 2018, 2030, 2045	Sehr geringe Gesteungskosten und Investitionsausgaben		Geringe Gesteungskosten und Investitionsausgaben		Moderate Gesteungskosten und Investitionsausgaben		Hohe Gesteungskosten und Investitionsausgaben		Sehr hohe Gesteungskosten und Investitionsausgaben
	Flexibilisierungsoptionen	Sehr hohe Flexibilität der Anlage mit sehr geringem Anstieg der Produktionskosten im flexiblen Betrieb		Hohe Flexibilität der Anlage mit geringem Anstieg der Produktionskosten im flexiblen Betrieb		Moderate Flexibilität der Anlage mit moderatem Anstieg der Produktionskosten im flexiblen Betrieb		Geringe Flexibilität der Anlage mit hohem Anstieg der Produktionskosten im flexiblen Betrieb		Sehr geringe Flexibilität der Anlage mit sehr hohem Anstieg der Produktionskosten im flexiblen Betrieb
Kraftstoffnutzung	Umwelteigenschaften	Emissionen am geringsten, keine neuen kommen hinzu		einzelne Emissionen (deutlich) verringert		Vor- und Nachteile wiegen sich auf		schlechte Emissionswerte		Emissionen am höchsten
	Energieinhalt	höchste Stoff- und Energiedichte		höhere Energiedichte (volumenbezogen)		Vor- und Nachteile wiegen sich auf		Energiedichte niedrig (volumenbezogen)		niedrigste Stoff- und Energiedichte
	Sicherheit, Handhabung	Kraftstoff ist unbedenklich für Mensch und Umwelt und unkritisch bei Handhabung		einzelne Eigenschaften zwar kritisch, aber Erfahrung im Umgang		Vor- und Nachteile wiegen sich auf		einzelne Eigenschaften kritisch und keine Erfahrung vorhanden		Kraftstoff extrem kritisch, hohes Gefahrenpotential bei Umgang

		+4	+3	+2	+1	0	-1	-2	-3	-4
Kraftstoffnutzung	Kompatibilität Normen / Regularien	Kraftstoff zu 100% kompatibel mit bestehenden Normen		Zulässig laut Norm, aber Erweiterung notwendig oder Norm in Arbeit		Größere Änderungen in vorhandener Norm notwendig oder neue Norm im Gespräch		Kraftstoff nur zu geringen Anteilen als Komponente zulässig, Änderung oder neue Norm noch nicht in Diskussion		keine Erwähnung in Norm
	Kompatibilität Technik	sofort bereit für eine Markteinführung, rückwärtskompatibel		wenige Anpassungen notwendig, vergleichbare Anwendungen bekannt		Einzelne technische Anpassungen notwendig		aufwendige technische Umrüstung und Anpassung		Kraftstoff aus technischer Sicht ungeeignet für Sektor, Umrüstung nicht sinnvoll / Neuentwicklung wäre notwendig
Integration ins Verkehrssystem	Kosten der Fahrzeughaltung	Keine Mehrkosten im Vergleich zu heutigen Benzin-/Diesel-Fahrzeugen		Geringe Mehrkosten		Moderate Mehrkosten		Hohe Mehrkosten		Sehr hohe Mehrkosten
	Tankvorgang	Betankungszeit vergleichbar mit heutigen Fahrzeugen & sehr hohe Reichweite		Betankungszeit geringfügig länger & hohe Reichweite		Betankungszeit moderat länger & ausreichende Reichweite		Betankungszeit deutlich länger & geringe Reichweite		Betankungszeit sehr viel länger & sehr geringe Reichweite
	Tankinfrastruktur	Kraftstoff kann über heute verfügbare Tankinfrastruktur in den Markt gebracht werden, kein Ausbau-/ Umrüstungsbedarf		Großteil der heute verfügbaren Tankinfrastruktur kann genutzt werden; Ausbau bzw. Umrüstungsbedarf verursacht geringe Investitionskosten		Heute nur wenige verfügbare Tankstellen; Ausbau bzw. Umrüstungsbedarf verursacht moderate Investitionskosten		Sehr wenige heute verfügbare Tankstellen; Ausbau bzw. Umrüstungsbedarf verursacht hohe Investitionskosten		Heute keine Tankstellen für Kraftstoff vorhanden; Ausbau bzw. Umrüstungsbedarf verursacht sehr hohe Investitionskosten
Ökologische Bewertung	Treibhausgasemissionen 2018, 2030, 2045	Sehr geringe THG-Emissionen über den gesamten Lebensweg; Minimalwert				Mittlere THG-Emissionen				Sehr hohe THG-Emissionen; Maximalwert
	Kumulierter Energieaufwand (KEA) 2018, 2030, 2045	Sehr geringer KEA über den gesamten Lebensweg; Minimalwert				Mittlerer KEA				Sehr hoher KEA; Maximalwert
	Ursprung des verwendeten CO <sub>2</sub>	DAC oder biogene Quellen		Müllverbrennung (je nach biogenem Anteil)		ICC Zement		ICC GuD		Abgase von fossilen Brennstoffen, die nicht energetisch genutzt werden.

		+4	+3	+2	+1	0	-1	-2	-3	-4
Akzeptanz	Kosten / Nutzen (Verteilungsgerechtigkeit)	Sehr geringe Kosten bzw. sehr günstiges Kosten / Nutzen-Verhältnis		Geringe Kosten bzw. günstiges Kosten / Nutzen-Verhältnis		Mittlere Kosten bzw. ausgeglichenes Kosten / Nutzen-Verhältnis		Hohe Kosten bzw. ungünstiges Kosten / Nutzen-Verhältnis		Sehr hohe Kosten bzw. sehr ungünstiges Kosten / Nutzen-Verhältnis
	Umweltwirkungen	Sehr geringe Umweltwirkungen (THG-/ Schadstoffemissionen, Ressourcenverbrauch etc.)		Geringe Umweltwirkungen (THG-/ Schadstoffemissionen, Ressourcenverbrauch etc.)		Mittlere Umweltwirkungen		Große Umweltwirkungen (THG-/Schadstoffemissionen, Ressourcenverbrauch etc.)		Sehr große Umweltwirkungen (THG-/Schadstoffemissionen, Ressourcenverbrauch etc.)
	Anwendungstauglichkeit	Anwendung ohne Anpassungsbedarf möglich (Technik, Infrastruktur, Handlungsprotokolle etc.)		Anwendung mit geringem Anpassungsbedarf verbunden		Anwendung mit mittlerem Anpassungsbedarf verbunden		Anwendung mit erhöhtem Anpassungsbedarf verbunden		Anwendung mit sehr hohem Anpassungsbedarf verbunden
Markteinführung	Wie sinnvoll sind MEM aus ökologisch-systemischer Sicht?	Sehr geringer Ressourcenverbrauch und sehr hohe systemische Notwendigkeit, deshalb MEM sehr sinnvoll		Geringer Ressourcenverbrauch und/oder hohe systemische Notwendigkeit, deshalb MEM sinnvoll		Ressourcenverbrauch hoch und systemische Notwendigkeit hoch, oder Ressourcenverbrauch gering und systemische Notwendigkeit gering, deshalb MEM evtl. sinnvoll		Hoher Ressourcenverbrauch und / oder kaum systemische Notwendigkeit, deshalb MEM nicht sinnvoll		Sehr hoher Ressourcenverbrauch und / oder keine systemische Notwendigkeit, deshalb MEM nicht sinnvoll
	Kann aus nachfrageseitiger Sicht auf MEM verzichtet werden?	Kosten für Verbraucher im Verhältnis zu Konsumausgaben und Kosten der Produktion im Verhältnis zum Bruttoinlandsprodukt sinken um über 3,75 %, kein MEM notwendig		Kosten für Verbraucher im Verhältnis zu Konsumausgaben und Kosten der Produktion im Verhältnis zum Bruttoinlandsprodukt sinken um rd. 2,5 %, kein MEM notwendig		Kosten bleiben ungefähr gleich, kein MEM notwendig		Kosten für Verbraucher im Verhältnis zu Konsumausgaben und Kosten der Produktion im Verhältnis zum Bruttoinlandsprodukt steigen um rd. 2,5 %, MEM notwendig		Kosten für Verbraucher im Verhältnis zu Konsumausgaben und Kosten der Produktion im Verhältnis zum Bruttoinlandsprodukt steigen um über 3,75 %, MEM notwendig
	Kann aus angebotsseitiger Sicht auf MEM verzichtet werden?	Errichtung gänzlich neuer Infrastruktur notwendig & massiver Abbau alter Infrastruktur deshalb MEM notwendig		Sehr aufwändige Auf-/Umrüstung von Infrastruktur notwendig, deshalb MEM notwendig.		Partielle Auf-/Umrüstung von Infrastruktur notwendig, MEM evtl. notwendig.		Partielle Auf-/Umrüstung von Infrastruktur notwendig, MEM nicht notwendig		Kaum Anpassung der Infrastruktur notwendig, MEM nicht notwendig



### 3.1 Integration in das Energiesystem

Bei der Bewertung der Integration in das Energiesystem wird die Veränderung des Stromsystems gegenüber einem Energiesystem ohne die Herstellung von synthetischen Kraftstoffen betrachtet, d.h. im Vergleichssystem wurde die Nachfrage nach synthetischen Kraftstoffen auf null gesetzt. Die quantitativen Indikatoren sind daher für die Kriterien 1 und 2 die Differenzen zu diesem System ohne Kraftstoffherstellung. Für die Bewertung der Integration der Kraftstoffe ins Energiesystem wurden drei Bewertungskriterien definiert:

- 1) Differenzkosten des Energiesystems
- 2) Strukturelle Veränderung des Energiesystems, Ausbau der erneuerbaren Erzeugung
- 3) Ausgenutzte Ressourcenpotenziale in Europa

Um Kraftstoffpfade im Energiesystem bewerten zu können, wird ein vereinfachtes Energiesystem in der Modellierung angenommen, in dem nur ein Kraftstoff mit einem Verfahren hergestellt wird. Dadurch sollen Effekte, die durch Wechselwirkung verschiedener Herstellungsverfahren im Energiesystem entstehen können, vermieden werden und die Ergebnisse können somit dem entsprechenden Kraftstoffpfad zugerechnet werden. Es wird auch jeweils nur die Herstellung eines Kraftstoffes betrachtet. Bei Verfahren, die mehrere Kraftstoffe herstellen, wird nur eine Zielfraktion betrachtet und die Ergebnisse darauf bezogen.

**Tabelle 3-3:** Bewertungsmetrik für das Energiesystem

	Differenzkosten des Energiesystems	Strukturelle Veränderung des Energiesystems, Ausbau der erneuerbaren Erzeugung	Ausgenutzte Ressourcenpotenziale in Europa
+4	544 Mrd €	739 GW	7,17%
+3	789 Mrd €	778 GW	7,33%
+2	1.033 Mrd €	817 GW	7,50%
+1	1.278 Mrd €	856 GW	7,67%
0	1.522 Mrd €	894 GW	7,83%
-1	1.767 Mrd €	933 GW	8,00%
-2	2.011 Mrd €	972 GW	8,17%
-3	2.256 Mrd €	1.011 GW	8,33%
-4	2.500 Mrd €	1.050 GW	8,50%

Die Kraftstoffbedarfe werden dabei aus dem PtX-Szenario (Szenariobeschreibung siehe Kapitel 6) als obere Abschätzung übernommen. Für den Straßenverkehr werden die Bedarfe auf eine Fahrleistung von 212 Milliarden Personenkilometer skaliert und mittels spezifischer Verbräuche und dem unteren Heizwert auf einen chemischen Energiebedarf umgerechnet. Die Verbräuche beziehen sich dabei auf die Summe des Personen- und Güterverkehrs. Die Skalierung dient dazu, bei unterschiedlichen spezifischen Energiegehalten der Kraftstoffe und de-

ren motorischer Wirkungsgrade die gleiche Transportdienstleistung zu erfüllen. Die spezifischen Verbräuche entsprechen den Annahmen, die auch für die LCA verwendet werden. Für Kerosin wird ein Bedarf von 100,7 TWh<sub>chem</sub> aus dem PtX-Szenario verwendet. Der Bedarf aus dem Straßenverkehr bewegt sich dabei abhängig vom Kraftstoff auf einem ähnlichen Niveau, so dass die Bewertungen grob vergleichbar sind.

Wir fokussieren uns dabei auf die Herstellung und Nutzung der Kraftstoffe in Deutschland, um auch hier eine Vergleichbarkeit zu gewährleisten. Da die EE-Potenziale in Deutschland nicht ausreichen, um die Kraftstoffe herzustellen (siehe auch Ergebnisse der Analysen in Kapitel 6.8), wird von einem Stromimport nach Deutschland ausgegangen und bei der Bewertung der EE-Ressourcen werden dabei die Flächen in Deutschlands Nachbarländern mit einbezogen. Dies ist natürlich eine stark vereinfachende Annahme, da die Nachbarländer ebenfalls Kraftstoffe herstellen wollen. Sie dient aber hier der analytischen Vereinfachung. Der Netzausbau wird daher auch nur innerhalb Deutschlands vom Modell optimiert.

### **Kriterium 1: Differenzkosten des Energiesystems**

In diesem Kriterium werden die Gesamtkosten des Stromsystems über eine systemweite Modellierung mit dem Energiesystemmodell REMix (s. Kap. 6.8) bewertet. Je nach Eigenschaft des Herstellungsprozesses müssen im Stromsystem zusätzliche Erzeugungs- und Transportkapazitäten zugebaut werden, um den Strombedarf des Herstellungsprozesses gegenüber einem System ohne die Herstellung von strombasierten Kraftstoffen zu decken. Als Basis wird ein weitgehend erneuerbares Energiesystem im Jahr 2050 aus dem PtX-Szenario genommen. Je nach Auslastung entstehen bei den einzelnen Erzeugungs- und Transportanlagen Kosten für die Strombereitstellung. Diese Kosten werden zu den Gesamtstromgestehungskosten aufaddiert.

Die Bewertungen ergeben sich aus den bei der Modellierung ermittelten Systemkosten. Die Minimal- und Maximalwerte sind in Tabelle 3-3 dargestellt.

### **Kriterium 2: Strukturelle Veränderung des Energiesystems**

Analog zum Kriterium 1 werden in Kriterium 2 die installierten Leistungen im Energiesystem betrachtet. Dabei werden die neu installierten erneuerbaren Erzeugungsleistungen im Energiesystem aufaddiert und mit einem System ohne die Herstellung von Kraftstoffen verglichen. Die quantitative Ausprägung des Kriteriums sind die zugebauten Erzeugungskapazitäten zur Deckung des Strombedarfs der Kraftstoffherstellung.

Die Bewertungen ergeben sich aus den bei der Modellierung ermittelten zusätzlich installierten erneuerbaren Erzeugungsleistungen. Die Minimal- und Maximalwerte sind in Tabelle 3-3 dargestellt.

### **Kriterium 3: Ausgenutzte Ressourcenpotenziale**

In diesem Kriterium wird untersucht, wie weit die noch vorhandenen Ressourcenpotenziale (verfügbare Flächen für erneuerbare Stromerzeugung) für die Herstellung der strombasierten Kraftstoffe genutzt werden. Der Vergleichswert hierbei ist ein System ohne die Herstellung der

Kraftstoffe. Da die verfügbaren Flächen in Deutschland nicht ausreichend sind, wird ein Ausbau in den Nachbarländern und ein Stromimport zugelassen. Die Absolutwerte sind aufgrund dieser vereinfachenden Annahme nur beschränkt interpretierbar, sie stellen einen für die Lösung des Optimierungsmodells notwendigen Stromimport nach Deutschland dar.

Die Bewertungen ergeben sich aus den bei der Modellierung ermittelten zusätzlich installierten erneuerbaren Erzeugungsleistungen im Verhältnis zum verfügbaren Potenzial. Die Minimal- und Maximalwerte sind in Tabelle 3-3 dargestellt.

## 3.2 Techno-ökonomische Bewertung der Herstellung

Für die techno-ökonomische Bewertung der Herstellung wurden fünf Bewertungskriterien definiert:

- 1) Effizienz der Herstellung
- 2) Kosten im Jahr 2018
- 3) Kosten im Jahr 2030
- 4) Kosten im Jahr 2045
- 5) Flexibilisierungsoptionen

Um die einzelnen Kraftstoffherstellungspfade aus technischer und ökonomischer Perspektive bewerten zu können, wird eine Bewertungsmetrik definiert, welche die jeweiligen Aspekte der Kraftstoffherstellungspfade evaluiert. Dabei erfolgt die technische Bewertung unabhängig von der ökonomischen. Die Bewertungsmetrik ist in Tabelle 3-4 aufgelistet.

**Tabelle 3-4:** Bewertungsmetrik für die techno-ökonom. Bewertung der Herstellungsprozesse

	Kriterium 1: Effizienz der Herstellung	Kriterien 2-4: Kosten in 2018, 2030, 2045	Kriterium 5: Flexibilisierungsoptionen
	$\eta \mid Y_c \mid Z_c$	NPC [ $\text{€}_{2018}/\text{GJ}_{\text{LHV}}$ ]   FCI [ $\text{Mrd. €}_{2020}$ ]	NPC-4   $\Delta\text{NPC}$   RM   $P_{\min}$
4	> 75%   > 95%   > 50%	< 20   < 0.5	< 20   < 25%   primär   < 5 %
3	> 70%   > 90%   > 45%	< 30   < 1.0	< 30   < 30%     < 10 %
2	> 65%   > 87%   > 42%	< 40   < 1.5	< 40   < 40%   sekundär   < 20 %
1	> 60%   > 85%   > 40%	< 50   < 2.0	< 50   < 50%     < 30 %
0	> 55%   > 82%   > 37%	< 60   < 2.5	< 60   < 60%     < 40 %
-1	> 50%   > 80%   > 35%	< 70   < 3.0	< 70   < 70%   tertiär   < 50 %
-2	> 45%   > 77%   > 30%	< 80   < 3.2	< 80   < 80%     < 60 %
-3	> 40%   > 75%   > 25%	< 90   < 3.4	< 90   < 85%     < 75 %
-4	< 40%   < 75%   < 25%	> 90   > 3.4	> 90   > 85%   nicht möglich   > 75 %

**Kriterium 1: Effizienz der Herstellung**

Für das Bewertungskriterium „Effizienz der Herstellung“ werden drei Indikatoren herangezogen. Diese sind:

- Wirkungsgrad des Herstellungsprozesses im Jahr 2018 |  $\eta$
- Kohlenstoffausbeute im Gesamtprozess |  $Y_C$
- Kohlenstoffausbeute im Zielfuel (Unterschiedlich zur Ausbeute im Gesamtprozess, falls es mehrere Produkte gibt) |  $Z_C$

Dabei geht  $\eta$  mit einer Gewichtung von 50 % ein,  $Y_C$  mit 30 % und  $Z_C$  mit 20 %.

**Kriterium 2: Kosten im Jahr 2018**

Für das Bewertungskriterium „Kosten im Jahr 2018“ werden zwei Indikatoren herangezogen. Diese sind:

- spezifische minimale Gestehungskosten des Kraftstoffs für das Jahr 2018 in  $\text{€}_{2018}/\text{GJ}_{\text{LHV}}$  | NPC
- die Investitionsausgaben für das Jahr 2018 in  $\text{€}_{2018}$  | FCI (die in Tabelle 3-4 angegebenen Grenzwerte gelten für die FCI inkl. Elektrolyse)

Dabei gehen die NPC mit 80 % und die FCI mit 20 % in die Gewichtung ein.

**Kriterium 3: Kosten im Jahr 2030**

Für das Bewertungskriterium „Kosten im Jahr 2030“ werden zwei Indikatoren herangezogen. Diese sind:

- spezifische minimale Gestehungskosten des Kraftstoffs für das Jahr 2030 in  $\text{€}_{2018}/\text{GJ}_{\text{LHV}}$  | NPC
- die Investitionsausgaben für das Jahr 2030 in  $\text{€}_{2018}$  | FCI (die in Tabelle 3-4 angegebenen Grenzwerte gelten für die FCI inkl. Elektrolyse)

**Kriterium 4: Kosten im Jahr 2045**

Für das Bewertungskriterium „Kosten im Jahr 2045“ werden zwei Indikatoren herangezogen. Diese sind:

- spezifische minimale Gestehungskosten (NPC) des Kraftstoffs für das Jahr 2045 in  $\text{€}_{2018}/\text{GJ}_{\text{LHV}}$
- die Investitionsausgaben für das Jahr 2045 in  $\text{€}_{2018}$  | FCI (die in Tabelle 3-4 angegebenen Grenzwerte gelten für die FCI inkl. Elektrolyse)

**Kriterium 5: Flexibilisierungsoptionen**

Für das Bewertungskriterium „Flexibilisierungsoptionen“ werden zwei Indikatoren herangezogen. Diese sind:

- spezifische Gesteungskosten des Kraftstoffs bei 4.000 Volllaststunden für das Jahr 2030 in €<sub>2018</sub>/GJ<sub>LHV</sub> | NPC-4
- Anstieg der spezifischen Gesteungskosten bei flexibler Betriebsweise (von 8.000 auf 4.000 Volllaststunden) im Bezugsjahr 2030 | ΔNPC
- potenzielle Teilnahme am Regelenergiemarkt | RM
- Minimale Teillast | P<sub>Min</sub>

Dabei geht NPC-4 mit einer Gewichtung von 50 % ein, ΔNPC mit 10 %, RM mit 20 % und P<sub>Min</sub> mit 20 %.

**3.3 Kraftstoffnutzung**

Für die Bewertung der Kraftstoffnutzung wurden fünf Bewertungskriterien definiert:

- 1) Umwelteigenschaften
- 2) Energieinhalt
- 3) Sicherheit und Handhabung (inkl. Haltbarkeit und Lagerfähigkeit)
- 4) Kompatibilität im relevanten Verkehrsbereich hinsichtlich Normen / Regularien
- 5) Kompatibilität im relevanten Verkehrsbereich hinsichtlich Technik

Die Bewertung eines jeden Kriteriums ergibt sich aus der Bewertung einzelner Indikatoren bzw. Eigenschaften. Die der Bewertung zugrunde liegende Skala ist in Tabelle 3-5 erläutert.

**Tabelle 3-5:** Definition der Skala für die Bewertung der Kraftstoffeigenschaften je Bewertungskriterium

	1) Umwelteigenschaften	2) Energieinhalt	3) Sicherheit, Handhabung	4) Kompatibilität Normen / Regularien	5) Kompatibilität Technik
+4	Emissionen am geringsten, neue kommen nicht hinzu (Kraftstoff mit den wenigsten Emissionen)	höchste Stoff- und Energiedichte, effiziente Verbrennung	Kraftstoff ist unbedenklich für Mensch und Umwelt und unkritisch bei Handhabung	Kraftstoff zu 100% kompatibel mit bestehenden Normen	sofort bereit für eine Markteinführung, rückwärtskompatibel
+3	einzelne Emissionen (deutlich) verringert	höhere Energiedichte (volumenbezogen), effizientere Verbrennung	einzelne Eigenschaften zwar kritisch, aber Erfahrung im Umgang	Zulässig laut Norm, aber Erweiterung notwendig oder Norm in Arbeit	wenige Anpassungen notwendig, vergleichbare Anwendungen bekannt
+2					
+1					
0	Vor- und Nachteile wiegen sich auf				
-1	schlechte Emissionswerte	Energiedichte niedrig (volumenbezogen), Verbrennung weniger effizient	einzelne Eigenschaften kritisch und keine Erfahrung vorhanden	Kraftstoff nur zu geringen Anteilen als Komponente zulässig, Änderung oder neue Norm noch nicht in Diskussion	aufwendige technische Umrüstung und Anpassung
-2					
-3					
-4	Emissionen am höchsten (Kraftstoff mit den meisten Emissionen)	niedrigste Stoff- und Energiedichte, Verbrennung weniger effizient	Kraftstoff extrem kritisch, hohes Gefahrenpotential bei Umgang	keine Erwähnung in Norm	Kraftstoff aus technischer Sicht ungeeignet für Verkehrsbereich, Umrüstung nicht sinnvoll / Neuentwicklung wäre notwendig

Die Bewertung erfolgt absolut und vergleichend über alle Kraftstoffe hinweg. D.h. wenn ein Kraftstoff eine +4 erhält, dann hat er für dieses Kriterium die besten Eigenschaften, umgekehrt bei einer -4 ist er am schlechtesten. Dazwischen wird abgestuft, wobei sich bei einer 0 Vor- und Nachteile des Kraftstoffs innerhalb eines Bewertungskriteriums ausgleichen (Ausnahme Kriterium 4, wo die 0 ebenfalls definiert wurde, siehe Tabelle 3-5). Es gilt auch zu beachten, dass kein Bewertungskriterium direkt bewertet wird, sondern sich dessen Bewertung jeweils aus dem gewichteten Mittelwert von unterschiedlichen Indikatoren ergibt. Im Folgenden ist für jedes Bewertungskriterium beschrieben, welche Indikatoren der Bewertung zu Grunde liegen und mit welcher Wichtung diese in die Gesamtbewertung eingehen.

### **Kriterium 1: Umwelteigenschaften**

Die Bewertung der Umwelteigenschaften ergibt sich vor allem aus dem Bildungspotential der Schadstoffe, die bei der Verbrennung des Kraftstoffes gebildet werden. Dabei werden sowohl bereits regulierte Schadstoffe wie auch unregulierte (z.B. Aldehyde und Ketone) betrachtet:

- Kohlenstoffmonoxid (CO)
- Stickoxide (NO<sub>x</sub>)
- Rußpartikel (Anzahl und Masse der Partikel gleichbedeutend)
- Unverbrannte Kohlenwasserstoffe (KW, auch HC-Emissionen genannt)
- Schwefelverbindungen
- Kohlendioxid (CO<sub>2</sub>) und Wasser (H<sub>2</sub>O)
- weitere Schadstoffe (v.a. Aldehyde / Ketone, Methanschlupf, N<sub>2</sub>O)

Es sei angemerkt, dass sich die Bewertung nicht ausschließlich nach der Einhaltung vorgegebener Grenzwerte der Abgasemissionen richtet. Zum einen, weil die Einhaltung von Emissionsrichtlinien als Grundvoraussetzung für den Einsatz angesehen wird. Aber auch, da die Bewertung über alle Kraftstoffe und Sektoren bzw. Verkehrsbereiche hinweg erfolgt und die Emissionen und Grenzwerte je nach Einsatzgebiet unterschiedlich reguliert sind.

CO<sub>2</sub>- und H<sub>2</sub>O-Emissionen werden zusammen betrachtet, da diese unabhängig von der Zusammensetzung des Kraftstoffes gebildet werden (außer bei Ammoniak). Vielmehr ergeben sich diese vor allem durch den Kraftstoffverbrauch. Hierfür dient die Bewertung des Energieinhaltes (Bewertungskriterium 2) als Hilfsmittel für die Bewertung: Ein hoher Energieinhalt bedeutet immer auch einen geringeren Verbrauch und damit geringere CO<sub>2</sub>- und H<sub>2</sub>O-Emissionen, als bei einem Kraftstoff mit einem niedrigeren Energieinhalt. Zudem wird berücksichtigt, dass ein hohes H:C-Verhältnis zu einer effizienteren Verbrennung beiträgt, was den Verbrauch und damit die CO<sub>2</sub>- und H<sub>2</sub>O-Emissionen ebenfalls verringert. Da die Bewertung hier rein anwendungsbezogen erfolgt, wird der Verbrauch von CO<sub>2</sub> bei der Herstellung nicht berücksichtigt. Für eine gesamtheitliche Bewertung, die Herstellung und Verbrennung umfasst, sei auf die ökologische Bewertung in Kapitel 3.5 verwiesen.

Bezüglich der Auflistung von Wasser in der Liste der Schadstoffemissionen sei ergänzt, dass Wasser-Emissionen im Vergleich zu den CO<sub>2</sub>-Emissionen in den meisten Fällen weit weniger klimaschädlich sind. Eine relevante emissionsbedingte Erhöhung der atmosphärischen Wasserdampfkonzentration wird in geringem Maße durch den Luftverkehr verursacht, da die Emissionen zum einen in Höhen mit vergleichbar geringer Hintergrundkonzentration freigesetzt werden. Zum anderen wird das Wasser teilweise in die Stratosphäre emittiert, in der es für

längere Zeit als Wasserdampf verweilen und sich entsprechend akkumulieren kann. Die resultierenden Klimateffekte sind derzeit jedoch gering im Vergleich zu anderen Luftfahrteffekten [Lee et al. 2021]. Das vom Luftverkehr freigesetzte Wasser spielt jedoch eine wichtige Rolle bei der Bildung von Kondensstreifen in der oberen Troposphäre und den sich nachgelagert daraus entwickelnden, weiter ausgedehnten Kondensstreifenzirren, welche einen besonders großen Beitrag zur Klimawirkung des Luftverkehrs leisten [Lee et al. 2021].

**Tabelle 3-6:** Zusammenstellung der Indikatoren bzw. Eigenschaften und deren Wichtung, wie sie in die Bewertung der Umwelteigenschaften (Bewertungskriterium 1) einfließen

Indikator / Eigenschaft	Wichtung	Erläuterung
CO	0,20	
NO <sub>x</sub>	0,20	Am stärksten gewichtet, da hauptbestimmend für Umwelteigenschaften und reglementiert
Ruß/Partikel (Anzahl, Masse)	0,20	
unverbrannte KW (HC-Emission)	0,10	
Schwefel- verbindungen	0,10	Nur bei Bewertung fossiler Referenzpfade relevant
CO <sub>2</sub> und H <sub>2</sub> O (Verbrauch)	0,10	Hier fließt Bewertung aus 2) Energieinhalt mit ein (Bsp.: Heizwert von Methanol kleiner als von Benzin, wodurch sich ggf. höherer Verbrauch ergibt)
weitere Schadstoffe (v.a. Aldehyde / Ketone, Methanschlupf, N <sub>2</sub> O)	0,10	Bewertung bei reinen Kohlenwasserstoffen mit 0 als bestes – mit +4 nicht sinnvoll, da Umwelteigenschaften ansonsten künstlich verbessert, v.a. bei fossilen Kraftstoffen

Neben den bekannten Schadstoffemissionen berücksichtigt die Bewertung der Umwelteigenschaften auch das Schädigungspotenzial möglicher neuer Emissionen sowie von Emissionen, die durch die Anwendung synthetischer Kraftstoffe vermehrt auftreten können. Konkret liegt das Augenmerk hier auf drei unterschiedlichen Arten an Schadstoffen: Aldehyde und Ketone, Lachgas (N<sub>2</sub>O) und Methan. Aldehyde und Ketone werden im Vergleich zu konventionellen (fossilen) bzw. reinen Kohlenwasserstoff-Kraftstoffen vermehrt bei der Verbrennung von sauerstoffhaltigen Kraftstoffen gebildet. Lachgas kann bei der Verbrennung von Ammoniak entstehen und weist ein um den Faktor 273 stärkeres Treibhausgaspotenzial auf als CO<sub>2</sub> [IPCC 2021]<sup>7</sup>. Die Emission von Methan ist weniger bei der Verbrennung, sondern eher bei der Handhabung relevant, wird hier aber berücksichtigt, da auch Methan ein Treibhausgas mit der 27- bis 30-fachen Klimawirkung von CO<sub>2</sub> [IPCC 2021] ist. Der Bewertungsskala folgend müsste das Schadstoffbildungspotenzial für diese Emissionen bei den reinen Kohlenwasserstoffen dann stets mit +4 bewertet werden, was die Umwelteigenschaften fossiler Kraftstoffe künstlich

<sup>7</sup> Treibhausgaspotenzial über einen Zeitraum von 100 Jahren (Global Warming Potential 100 / GWP-100)



aufwerten würde. Auch wäre die Bewertung mit +4 nicht sinnvoll, da dieser Indikator nur eingeführt wurde, um die Bildung solcher neuen Schadstoffe zu berücksichtigen. Daher wird hier von der Bewertungsskala, wie sie in Tabelle 3-5 gezeigt ist, etwas abgewichen und die 0 als Bestnote für reine Kohlenwasserstoffe vergeben.

In Tabelle 3-6 sind die einzelnen Indikatoren und ihre Wichtung, wie sie in die Gesamtbewertung eingehen, aufgeführt. CO-, NO<sub>x</sub>- und Partikelemissionen werden stärker gewichtet, da diese hauptbestimmend für die Umwelteigenschaften und auch reglementiert sind. Bei der Bewertung dieser Emissionen wird auch die Möglichkeit der Abgasnachbehandlung berücksichtigt. Schwefelemissionen treten nur bei der Verbrennung rohölbasierter Produkte auf (wegen des natürlichen Vorkommens im Rohöl), sind daher für synthetische Kraftstoffe ohne Bedeutung. Da im Rahmen von BEniVer zum Vergleich auch verschiedene Referenzpfade betrachtet werden, welche u.a. auch die rohölbasierten Kraftstoffe enthalten, werden Schwefelemissionen bei der Bewertung in diesem Falle mitberücksichtigt. Für strombasierte Kraftstoffe ergibt sich hier immer eine Bewertung mit +4, was die verbesserten Umwelteigenschaften auch in der Gesamtbewertung widerspiegelt.

Ergänzend zur Beschreibung der Bewertung der Umwelteigenschaften sei angemerkt, dass der gewählte emissionsbasierte Ansatz sich insbesondere für Substanzen eignet, deren Schädigungspotenzial mit der Emissionsstärke zunimmt, wie beispielsweise CO<sub>2</sub> oder Emissionskomponenten mit direkter Relevanz für die Luftqualität. Zur Bewertung von Klimawirkungen gibt es jedoch Einschränkungen, da die Emissionen kurzlebiger Komponenten auch klimaabkühlend wirken können. Hier seien insbesondere partikelinduzierte Kühlungseffekte [Righi et al. 2013] sowie die durch Reduktion der chemischen Lebensdauer von Methan hervorgerufene Kühlung genannt [Hoor et al. 2009]. Diese Effekte verhalten sich jedoch nichtlinear und können daher nur auf Basis detaillierter Klima-Chemie-Modelle quantifiziert und bewertet werden. Dies gilt zudem für die emissionsinduzierte Produktion des Treibhausgases Ozon, die besonders starke Nichtlinearitäten zeigt. Diese Prozesse sind Gegenstand laufender Forschungsvorhaben und sollten im Rahmen zukünftiger Projekte in die Bewertung integriert werden, wobei zudem mögliche „Trade-Offs“ zwischen dem Schutz des Klimas und der Luftqualität zu betrachten sind. Zukünftige Bewertungen möglicher Beeinträchtigungen der Luftqualität könnten zudem auch auf die Häufigkeit von Grenzwertüberschreitungen atmosphärischer Schadstoffkonzentrationen Bezug nehmen, die besonders im Falle von NO<sub>x</sub> und Partikeln von Relevanz sind [Kessinger et al. 2022]. Der Fokus sollte zudem auch auf die Abgasnachbehandlung gerichtet werden, die zur Emission zusätzlicher Schadstoffe führen kann (z.B. Ammoniak oder Isocyanensäure).

Einige denkbare Emissionskomponenten, welche nicht nur bei der Nutzung, sondern auch der Herstellung synthetischer Kraftstoffe freigesetzt werden können, bleiben hier noch unberücksichtigt, da ihre atmosphärischen Wirkungen noch im Detail zu untersuchen sind. Hierbei handelt es sich beispielsweise um mögliche Emissionen von Ammoniak durch Leckagen und Schlupf bei der Nutzung im Schiffsverkehr. Ammoniak ist ein wichtiges Vorläufergas von atmosphärischen Aerosolpartikeln. Es kann zu einer Erhöhung der Partikelzahl sowie der Konzentration einiger Partikelbestandteile (z.B. Ammonium, Nitrat) führen. Dies kann zum einen eine kühlende Wirkung auf das Klima haben [Bellouin et al. 2011], zum anderen jedoch aufgrund der Toxizität der Partikel zu einer verstärkten Beeinträchtigung der Luftqualität führen. Auch die Freisetzung von Wasserstoff durch Leckagen und Schupf könnte durch Beeinflussung der atmosphärischen Chemie relevante Einflüsse auf das Klima haben [Hauglustaine et

al. 2022], worauf sich derzeit verschiedene Forschungsvorhaben richten und was zukünftig weiter zu vertiefen wäre.

### **Kriterium 2: Energieinhalt**

In die Bewertung des Energieinhaltes fließen die volumetrische und die gravimetrische Energiedichte sowie die Stoffdichte des Kraftstoffes ein. Da Kraftstofftanks in erster Linie durch das Volumen begrenzt sind, ist die volumetrische Energiedichte von größerer Bedeutung als die gravimetrische und wird daher stärker gewichtet (siehe Tabelle 3-7). Ferner sind die volumetrische und gravimetrische Energiedichte über die Stoffdichte miteinander gekoppelt, d.h. die gravimetrische Energiedichte kann aus der volumetrischen und der Stoffdichte berechnet werden.

Die Bewertung von sowohl der Stoffdichte als auch der Energiedichte, ermöglicht die Berücksichtigung der Molekülstruktur und -zusammensetzung und ist insofern keine Doppelung innerhalb der Bewertungsmatrix. Hinsichtlich der Molekülstruktur trägt vor allem das Vorhandensein von Komponenten aus der Strukturgruppe der Aromaten zu einer hohen Stoffdichte bei. Bei Kohlenwasserstoffgemischen, die wie der Name sagt, nur aus C- und H-Atomen bestehen, wozu alle rohölbasierten Kraftstoffe zählen, ist das gleichbedeutend mit einer höheren volumetrischen Energiedichte. Andererseits erhöht sich bei Abwesenheit von Aromaten das H:C-Verhältnis, was zu einer höheren gravimetrischen Energiedichte führt.

Ändert sich die Molekülzusammensetzung, d.h. es kommen sauerstoffhaltige Verbindungen hinzu, korrelieren Stoff- und Energiedichte nicht mehr miteinander. Als Beispiel dafür sei der Vergleich von Methanol und Benzin genannt: Methanol hat mit  $790 \text{ g/cm}^3$  zwar eine höhere Stoffdichte als Benzin, das im Bereich von  $720$  bis  $775 \text{ g/cm}^3$  liegt. Die volumetrische Energiedichte von Benzin ist mit  $30,8 \text{ MJ/l}$  hingegen in etwa doppelt so groß wie die von Methanol, welches hier einen Wert von  $15,7 \text{ MJ/l}$  aufweist. Der geringere Energieinhalt des Methanols resultiert hier aus dem Vorhandensein von Sauerstoff im Molekül.

**Tabelle 3-7:** Zusammenstellung der Indikatoren bzw. Eigenschaften und deren Wichtung, wie sie in die Bewertung des Energieinhaltes (Bewertungskriterium 2) einfließen

Indikator / Eigenschaft	Wichtung	Erläuterung
Energiedichte volumetrisch	0,40	gravimetrische Energiedichte ergibt sich aus Stoffdichte und volumetrischer Energiedichte (und umgekehrt); da Tank hinsichtlich des Volumens begrenzt ist, wird diese stärker gewichtet
Energiedichte gravimetrisch	0,20	
Dichte (Stoffdichte)	0,40	

Es sei angemerkt, dass der Energiegehalt nicht zwangsweise auch den Kraftstoffverbrauch oder die Reichweite widerspiegelt. Diese Parameter hängen auch von der Art des Verkehrsmittels sowie der Effizienz der Verbrennung ab. Letztere kann durch geänderte Motoreinstellungen an einen neuen Kraftstoff angepasst werden, sodass ein alternativer Kraftstoff mit etwas geringerem Energiegehalt hinsichtlich des Verbrauches trotzdem im Bereich eines konventionellen Kraftstoffes liegen kann. Aber auch Art und Alter des Motors selbst spielen hier

eine Rolle. Wie zuvor erläutert, haben synthetisches Benzin, Diesel oder Kerosin aufgrund weniger bzw. fehlender Aromaten eine etwas geringere volumetrische Energiedichte als ihre fossilen Pendanten, was sich aufgrund der höheren Wichtung der volumetrischen Energiedichte negativ auswirkt. Aufgrund des höheren H-Anteils ist ihre gravimetrische Energiedichte aber etwas höher, was auch zu einer besseren Verbrennung beiträgt.

### **Kriterium 3: Sicherheit und Handhabung (inkl. Haltbarkeit und Lagerfähigkeit)**

Die Bewertung für die Sicherheit und Handhabung eines Kraftstoffes, wozu auch die Haltbarkeit und Lagerfähigkeit gehören, ergibt sich hauptsächlich aus den physikalischen Eigenschaften, welche in Tabelle 3-8 aufgelistet sind. Je nach Bedeutung gehen auch diese mit einer unterschiedlichen Wichtung in die Bewertung ein.

Was das Siedeverhalten von flüssigen Kraftstoffen betrifft, ist der Siedepunkt (für Reinstoffe) bzw. der Siedebereich (für Stoffgemische) vom Dampfdruck abhängig. Da dieser allerdings ein Maß für die Gasmenge bei Raumtemperatur (20 °C) ist, hat dieser aus sicherheitstechnischer Sicht eine größere Bedeutung und wird daher stärker gewichtet als die Siedetemperatur bzw. der Siedebereich.

Bei den Zündeigenschaften ist die Zündtemperatur aus sicherheitstechnischer Sicht von größerer Bedeutung als die Zündgrenzen, welche vor allem bei der Handhabung in geschlossenen Räumen zu beachten sind. Tankvorgänge finden für gewöhnlich allerdings unter freiem Himmel statt, weswegen die Zündgrenzen mit einer niedrigeren Wichtung als die Zündtemperatur in die Bewertung eingehen. Zu den Zünd- und Verbrennungseigenschaften zählt außerdem auch der Indikator „Oktanzahl / Cetanzahl / Methanzahl + Wobbeindex“, dessen Bewertung abhängig von der betrachteten Anwendung bzw. dem Einsatzgebiet ist. Die Bewertung der Oktanzahl wird herangezogen, wenn der synthetische Kraftstoff in einem Ottomotor zum Einsatz kommen soll. Die Cetanzahl ist von Bedeutung, wenn es um die Anwendung in einem Dieselmotor geht. Wird ein gasförmiger Kraftstoff betrachtet, werden gleichermaßen die Methanzahl und der Wobbeindex zur Bewertung herangezogen.

Die Erfüllung geforderter Fließeigenschaften ist bei synthetischen Reinkraftstoffen in der Anwendung meist unproblematisch, wenn bereits die Stoffdichte und das Siedeverhalten der geforderten Norm entsprechen oder mit dem Standardkraftstoff vergleichbar sind. Bei der Bereitstellung von Kraftstoffblends aus unterschiedlichen Komponenten müssen unterschiedliche Viskositäten und die Oberflächenspannung allerdings beachtet werden, wenn es darum geht ein möglichst homogenes Gemisch zu erzeugen. Dies ist vor allem für eine gleichmäßige Verdampfung, und damit auch für eine gleichmäßige Verbrennung, von Bedeutung.

**Tabelle 3-8:** Zusammenstellung der Indikatoren bzw. Eigenschaften und deren Wichtung, wie sie in die Bewertung des Bereiches Sicherheit und Handhabung einfließen

Indikator / Eigenschaft	Wichtung	Erläuterung	Wichtung für Gase
Verdampfungseigenschaften	Siedepunkt / Siedebereich	0,05 Siedepunkt zwar abhängig vom Dampfdruck, ist aber relevant bei Verdampfung; aus sicherheitstechnischer Sicht Dampfdruck wichtiger, da Maß dafür, welche Gasmenge bei Raumtemperatur (20 °C) vorhanden	0,20
	Dampfdruck	0,10	Mit 0 gewichtete Eigenschaften für Gase nicht relevant
Gefrierpunkt	0,10	Gefahr der Ausflockung	0,00
Zündeigenschaften	Zündtemperatur	0,10 Zündgrenzen v.a. bei Handhabung in geschlossenen Räumen zu beachten, Zündtemperatur daher wichtiger	0,20
	Zündgrenzen	0,05	0,20
	Oktanzahl / Cetanzahl / Methanzahl + Wobbeindex	0,10 je nach Anwendung/Einsatzgebiet bewertet, für Gase Methanzahl und Wobbeindex je 0,05	0,05 0,05
	Flammpunkt	0,10	0,00
Stabilität	Hygroskopizität	0,05 Restwassergehalt in Kraftstoffen mindert Heizwert und kann zu Korrosion führen	0,00 Bei Gasen nicht relevant, da vor Anwendung getrocknet
	(Oxidations-) Stabilität	0,05 z.B. JFTOT bei Luftfahrt	0,05
	Diffusivität	0,00 Wichtung hier mit 0, da nur bei Gasen (H <sub>2</sub> ) relevant	0,05
Fließeigenschaften	Oberflächenspannung	0,10	0,00
	Dynamische Viskosität	0,05	0,00
	Kinematische Viskosität	0,05	0,00
Gefahrenpotenzial bei unsachgemäßer Anwendung	0,10	Risiken, wenn schlagartige Freisetzung (giftig? leicht entzündlich? ...)	0,20

Das „Gefahrenpotenzial bei unsachgemäßer Anwendung“ ist der einzige bewertete Indikator, bei dem es sich nicht um eine Kraftstoffeigenschaft handelt. Die Bewertung hierfür ergibt sich aus der Gefahrstoffkennzeichnung (Humantoxizität und ob der Stoff leicht oder schwer entzündlich ist) sowie den Risiken, welche bei einer ungewollten schlagartigen Freisetzung von größeren Mengen des Kraftstoffes bestehen.

Wie in der Tabelle 3-8 ebenfalls aufgeführt, wurde für die gasförmigen Kraftstoffe eine etwas andere Wichtung verwendet, da die bewerteten Eigenschaften hier tlw. von anderer Bedeutung sind. Beispielsweise sind Dampfdruck und Gefrierpunkt bei Gasen weder für die Sicherheit noch für die Handhabung von Bedeutung. Anders ist es beim Siedepunkt, wenn es darum geht, dass das Gas tiefkalt verflüssigt gelagert werden soll. Aus sicherheitstechnischer Sicht sind hier auch die Zündigenschaften von Bedeutung, v.a. wenn es sich um eine Gasmischung mit Wasserstoff handelt. Ferner ist bei Wasserstoff auch dessen Diffusivität relevant.

#### **Kriterium 4: Kompatibilität im relevanten Verkehrsbereich hinsichtlich Normen / Regularien**

Die Bewertung für die Kompatibilität hinsichtlich Normen und Regularien im betrachteten Verkehrsbereich beinhaltet Aussagen zur erfolgten REACH-Registrierung bei der ECHA (European Chemicals Agency), der Normkonformität und für die Anwendung des Kraftstoffes relevante Verordnungen. Für letztere sind nationale wie auch internationale Vorgaben relevant, wie z.B. die 10. BImSchV und RED II bzw. RED III der EU. Der mit Abstand wichtigste Faktor ist hier die Übereinstimmung des Kraftstoffes mit einer bereits vorhandenen Norm, da dadurch die Einsatzfähigkeit des Kraftstoffes geregelt ist. Die REACH-Registrierung und die Verordnungen fallen bei der Bewertung weniger ins Gewicht (siehe Tabelle 3-9), da die Registrierung bei der ECHA oder auch die Eintragung in nationale Kraftstoffregister in der Verantwortung des Herstellers bzw. Importeurs liegt und gesetzliche Vorgaben zur Beschaffenheit des Kraftstoffes, wie sie in der BImSchV oder der RED vorgegeben sind, bei der Entwicklung synthetischer Kraftstoffe bereits mit berücksichtigt werden können.

**Tabelle 3-9:** Zusammenstellung der Indikatoren bzw. Eigenschaften und deren Wichtung, wie sie in die Bewertung der Kompatibilität mit Normen und Regularien einfließen

Indikator / Eigenschaft	Wichtung	Erläuterung
REACH	0,10	Registrierung erfolgt?
Normen	0,70	Ist eine Norm (z.B. DIN oder ASTM) vorhanden oder in Arbeit?
Verordnungen	0,20	Weitere Verordnungen oder Vorgaben, die erfüllt sein müssen? (z.B. 10. BImSchV, RED)

#### **Kriterium 5: Kompatibilität im relevanten Verkehrsbereich hinsichtlich Technik**

Die Bewertung der technischen Kompatibilität ergibt sich aus der Eignung zur Umrüstung, aus der Materialverträglichkeit, der Drop-In-Fähigkeit des synthetischen Kraftstoffes und wieweit die Anwendung des Kraftstoffes allgemein bekannt ist bzw. welche Erfahrung hier vorhanden ist. Wie in Tabelle 3-10 aufgeführt, wird die Möglichkeit zur Umrüstung am stärksten gewichtet,

da hierbei nicht nur berücksichtigt wird, inwieweit eine Umrüstung möglich ist, sondern auch welcher wirtschaftliche Aufwand damit verbunden ist. Betrachtet wird hierbei immer die Umrüstung ausgehend vom gegenwärtig üblichen, d.h. am weitesten verbreiteten Kraftstoff im jeweiligen Anwendungsgebiet. Beispielsweise gehören Erdgasfahrzeuge oder LNG-Schiffe zum Stand der Technik, nehmen aber nur einen geringen Anteil in der Anwendung ein. Hinsichtlich der Verringerung von Schadstoffemissionen ist die stärkere Nutzung von Erdgas als Kraftstoff allerdings eine mögliche Option, weswegen u.a. auch eine Umrüstung von mit flüssigen Kraftstoffen betriebenen Fahrzeugen oder Schiffen auf Antriebe mit Gasmotoren betrachtet und bewertet wird, obwohl solche Fahrzeuge bzw. Schiffe schon seit längerer Zeit im Einsatz sind. Für die Bewertung der Umrüstung werden folgenden Grenzen definiert:

- „+4“, wenn der Kraftstoff vollständig kompatibel ist, d.h. eine Umrüstung ist nicht notwendig und es entstehen daher keine Kosten
- „+3“, wenn kleinere Umrüstarbeiten (z.B. Austausch von Dichtungen oder Ventilen) notwendig sind, diese aber im Rahmen von routinemäßigen Wartungen durchgeführt werden können, sodass keine (nennenswerten) Mehrkosten anfallen
- „-2“ definiert die maximalen Umrüstkosten – eine Umrüstung ist möglich aber mit sehr hohen Kosten verbunden
- „-4“, wenn gar keine Umrüstung möglich ist bzw. wirtschaftlich nicht sinnvoll ist

Von „+3“ bis „-2“ wird die Bewertung hinsichtlich des Aufwandes abgestuft. Die Abstufung ist hierbei stark vom Verkehrsbereich bzw. dem Einsatzgebiet abhängig. Während im Pkw-Bereich Umrüstkosten bis 5.000 € als vertretbare Maximalkosten angesehen werden, sind vierstellige Umrüstkosten für schwere Nutzfahrzeuge noch wirtschaftlich tolerabel und erst ab 20.000 € ist eine Umrüstung hier nicht mehr wirtschaftlich. Für die Schifffahrt wären entsprechend höhere Kosten akzeptabel, eine Quantifizierung ist hier mangels Datengrundlage allerdings schwer möglich. Gleiches würde für die Luftfahrt gelten, allerdings kommen hier gegenwärtig ohnehin nur Treibstoffe in Frage, die mit der gängigen Technologie kompatibel sind, sodass die Frage nach der Umrüstung hier momentan nicht bzw. weniger relevant ist.

Basis für die Bewertung der Materialverträglichkeit und der Drop-In-Fähigkeit sind vor allem die Informationen aus den Verbundprojekten. Darüber hinaus lässt sich die Beurteilung der Verwendung als Drop-In-Kraftstoff aus den relevanten Kraftstoffeigenschaften ableiten.

**Tabelle 3-10:** Zusammenstellung der Indikatoren bzw. Eigenschaften und deren Wichtigung, wie sie in die Bewertung der technischen Kompatibilität einfließen

Indikator / Eigenschaft	Wichtung	Erläuterung
Umrüstung	0,40	Ist eine Umrüstung möglich bzw. (wirtschaftlich) sinnvoll?
Materialverträglichkeit	0,20	
Drop-In-fähig	0,20	
Anwendung bekannt / Erfahrung	0,20	Ist eine vergleichbare Anwendung bekannt?

Als weiteren Wertungsbereich werden noch Erfahrungswerte der Kraftstofftechnologie berücksichtigt. Dazu zählen neben dem TRL-Level auch die Berücksichtigung vergleichbarer Anwendungen, welche bereits existieren. Beispielsweise gibt es alternative Kraftstoffe, die zwar noch nicht aus erneuerbarem Strom hergestellt werden (können) und / oder in Deutschland noch nicht zugelassen sind, aber in anderen Ländern bereits Anwendung finden, wie z.B. Methanol, was in China bereits als Kraftstoff genutzt wird und in den USA zumindest mit hohem Anteil als Beimischung zum Benzin zugelassen ist.

### 3.4 Integration ins Verkehrssystem: Straße

Für die Bewertung der Integration der Kraftstoffe ins Verkehrssystem wurden drei Bewertungskriterien definiert:

- 1) Kosten der Fahrzeughaltung
- 2) Tankvorgang
- 3) Tankinfrastruktur

Analog zur Bewertung für den Sektor Straße werden auch die Sektoren Luftfahrt, Schifffahrt und Rückverstromung betrachtet. Mangels Datengrundlage kann die Bewertung hier zum Teil nur qualitativ erfolgen. Da sich die Bewertung dadurch vom Sektor Straße unterscheidet, wird auf die Vorgehensweise bei der Bewertung dieser Sektoren im Kapitel 4.4 direkt in Zusammenhang mit der Bewertung eingegangen.

#### **Kriterium 1: Kosten der Fahrzeughaltung**

Die Kosten der Fahrzeughaltung berücksichtigt Anschaffungskosten sowie der Kraftstoffkosten über die Gesamtlebensdauer des Fahrzeugs. Zusätzlich werden die Anschaffungs- und die Kraftstoffkosten pro 100 km zu Illustrationszwecken dargestellt. Dabei ergeben sich die Min- und Max-Werte aus den oberen und unteren Grenzen der bewerteten generischen Kraftstoffpfade. Die Kosten werden jeweils exklusive Mehrwertsteuer (MwSt) und exklusive Energiesteuer (EnergieSt) berechnet, so dass die Vergleichbarkeit zwischen den teilweise unterschiedlich besteuerten Kraftstoffarten gewährleistet ist. Folgende Bewertungsskala wurde für die Kosten der Fahrzeughaltung herangezogen:

**Tabelle 3-11:** Bewertungsmetrik des Kriteriums 1: Kosten der Fahrzeughaltung

Bewertungskriterium	Pkw	LNf	SNF	Bewertung	Gewicht
Anschaffungskosten Fahrzeug exkl. MwSt (€)	19.000 €	30.000 €	110.000 €	+4	0
	20.000 €	33.000 €	115.000 €	+2	
	21.000 €	36.000 €	120.000 €	0	
	22.000 €	39.000 €	125.000 €	-2	
	23.000 €	42.000 €	130.000 €	-4	
Kraftstoffkosten exkl. EnergieSt und MwSt (€/100km)	2,0	5,0	15,0	+4	0
	6,0	10,0	33,8	+2	
	10,0	15,0	52,5	0	
	14,0	20,0	71,3	-2	
	18,0	25,0	90,0	-4	
Summe aus Anschaffungs- und Kraftstoffkosten exkl. EnergieSt und MwSt (Pkw: 185.000 km Fahrleistung, SNF: 840.000 km Fahrleis- tung; 5 Jahre)	25.000 €	45.000 €	250.000 €	+4	1
	31.750 €	53.750 €	412.500 €	+2	
	38.500 €	62.500 €	575.000 €	0	
	45.250 €	71.250 €	737.500 €	-2	
	52.000 €	80.000 €	900.000 €	-4	

**Kriterium 2: Tankvorgang****Tabelle 3-12:** Bewertungsmetrik des Kriteriums 2: Tankvorgang

Bewertungskriterium	Indikator Pkw u. LNf	Indikator SNF	Bewertung	Gewich- tung
Betankungszeit (min/100km)	0,2	0,2	+4	0,5
	2,7	2,7	+2	
	5,1	5,1	0	
	7,6	7,6	-2	
	10,0	10,0	-4	
Reichweite pro Tankvorgang (km)	700	3500	+4	0,5
	550	3000	+2	
	400	2500	0	
	250	1500	-2	
	100	500	-4	

Das Kriterium 2 bewertet den Aufwand für die Betankung des Fahrzeugs aus der Sicht des Fahrzeughalters. Dabei stehen vor allem die Häufigkeit sowie die Dauer des Tankvorgangs im Fokus. Das *Kriterium 2: Tankvorgang* ergibt sich zu gleichen Teilen aus der Einzelwertung der Betankungszeit sowie der Reichweite pro Tankvorgang.



**Kriterium 3: Tankinfrastruktur****Tabelle 3-13:** Bewertungsmetrik des Kriteriums 3: Tankinfrastruktur

Bewertungskriterium	Indikator	Bewertung	Gewichtung
Tankstellenverfügbarkeit 2022 (%)	50%	+4	0,5
		+2	
	5%	0	
		-2	
	0%	-4	
Investitionsaufwand (Pkw: ca. 7.000 Tankstellen, SNF: ca. 700 Autobahn-Tankstellen) (Mio. €)	0 Mio. €	+4	0,5
		+2	
	150 Mio. €	0	
		-2	
	5.000 Mio. €	-4	

Kriterium 3 bewertet, inwiefern die heutige Tankinfrastruktur ohne Anpassung für den synthetischen Kraftstoff genutzt werden könnte bzw. den monetären Aufwand für die Umrüstung / den Neubau der Tankstelleninfrastruktur. Der Indikator „Infrastrukturverfügbarkeit“ errechnet sich aus dem Quotienten der Anzahl heutiger Tankstellen für den untersuchten Kraftstoff (z.B. ca. 6.800 Autogas-Tankstellen) und der aktuellen Anzahl Tankstellen für Benzin (ca. 14.000). Das Kriterium 3: Tankinfrastruktur ergibt sich zu gleichen Teilen aus der Einzelwertung der aktuellen Tankstellenverfügbarkeit sowie des Investitionsaufwandes.

### 3.5 Ökologische Bewertung

Für die ökologische Bewertung wurden sieben Bewertungskriterien definiert:

Kriterien 1 & 2 & 3: Treibhausgas(THG)-Emissionen 2018 & 2030 & 2045

Kriterien 4 & 5 & 6: Kumulierter Energieaufwand 2018 & 2030 & 2045

Kriterium 7: Ursprung des verwendeten CO<sub>2</sub>

Kriterien eins bis sechs basieren auf der Methodik der Ökobilanzierung und werden deshalb gemeinsam im folgenden Abschnitt erläutert. Daran anschließend wird Kriterium sieben erklärt.

#### **Kriterien 1 & 2 & 3: THG-Emissionen 2018 & 2030 & 2045 und Kriterien 4 & 5 & 6: Kumulierter Energieaufwand 2018 & 2030 & 2045**

Mithilfe der sechs Kriterien werden die THG-Emissionen und der kumulierte Energieaufwand über den zeitlichen Verlauf bewertet. Zusätzliche Treibhausgase verstärken den Treibhauseffekt, der den globalen Klimawandel mit vielen direkten und indirekten Auswirkungen verursacht.

Der kumulierte Energieaufwand spiegelt den Input an fossilen Primärenergieressourcen, welche für die Bereitstellung von Endenergie benötigt werden, wider. Die Verbrennung fossiler Primärenergieressourcen fördert den Klimawandel, da so ehemals eingelagerte Kohlenstoffe freigesetzt werden. Somit besteht ein enger Zusammenhang zwischen den beiden Wirkungskategorien Klimaänderung und kumulierter Energieaufwand.

Beide Kategorien bewerten die Kraftstoffe anhand der Umweltwirkungen, welche über den gesamten Lebenszyklus entstehen. Das schließt die Strombereitstellung, Elektrolyse, CO<sub>2</sub>-Abscheidung, Synthese und Kraftstoffnutzung, also die Verbrennung im Fahrzeug, mit ein. Dabei werden sowohl die Emissionen, die beim Betrieb der Anlagen oder der Verbrennung entstehen, als auch die Emissionen, welche durch die Herstellung der Anlagen und Fahrzeuge, die Materialbeschaffung und -entsorgung entstehen, bilanziert. Die abgeschiedenen CO<sub>2</sub>-Emissionen werden dem Kraftstoff zugeschrieben.

Die Bewertung erfolgt für die Jahre 2018, 2030 und 2045. Wie bereits in Kapitel 0 beschrieben, wurde keine Anpassung der Hintergrunddatenbank für zukünftige Jahre durchgeführt. Die funktionelle Einheit der Ökobilanz ist "1 km". Die Festlegung der Skala erfolgt separat für jeden Transportbereich. Obwohl jeder Verkehrsbereich dieselbe funktionelle Einheit betrachtet, können die Ergebnisse nicht bereichsübergreifend bewertet werden. Das würde dazu führen, dass unterschiedliche Funktionen, z. B. Transport von Gütern und Mobilität von Personen, miteinander verglichen werden. Für jeden Transportbereich wurden der Minimalwert und der Maximalwert der drei Jahre und aller Pfade ermittelt und die Grenzen in der Bewertungsskala zwischen den beiden Extremen linear verteilt. Daraus ergeben sich die Skalen für die THG-Emissionen und den kumulierten Energieaufwand der Kraftstoffe, wie sie in Tabelle 3-14 und Tabelle 3-15 dargestellt sind. Die Werte entsprechen jeweils der unteren Grenze der jeweiligen Bewertung.

Wie in Kapitel 2.3 bereits ausgeführt, stützt sich die ökologische Bewertung vornehmlich auf die Analyse der Emissionen langlebiger Treibhausgase. Kurzlebige Emissionskomponenten, welche ebenfalls sehr relevante Klimawirkungen haben können, werden lediglich im Zusammenhang mit der Bewertung der Kraftstoffnutzung berücksichtigt (vgl. Kapitel 3.3, Kriterium 1). Über die Bedeutung derartiger Emissionen bei der Kraftstoffherstellung liegen noch wenig Informationen vor. Dies sollte Gegenstand zukünftiger Forschungsvorhaben sein, bei denen auch mögliche Beeinträchtigungen der Luftqualität adressiert werden (vgl. Kapitel 10).

**Tabelle 3-14:** Bewertungsskala für THG-Emissionen. Die THG-Emissionen entsprechen jeweils der unteren Grenze der jeweiligen Bewertung

	Treibhausgasemissionen in kg CO <sub>2</sub> -Äq./km					
	Straße (Pkw)	Straße (LNF)	Straße (SNF)	Luftfahrt	Schiff	Rückverstromung
+4	0,1	0,1	0,2	6	50	0,2
+3	0,1	0,1	0,5	13	114	0,4
+2	0,2	0,3	1,0	28	243	0,7
+1	0,4	0,4	1,5	43	372	1,1
0	0,5	0,6	1,9	59	500	1,5
-1	0,6	0,7	2,4	74	629	1,9
-2	0,7	0,9	2,9	89	758	2,3
-3	0,8	1,0	3,4	104	886	2,7
-4	0,9	1,2	3,9	119	1015	3,1
Max.	1,0	1,3	4,1	127	1079	3,3

**Tabelle 3-15:** Bewertungsskala für den kumulierten Energieaufwand. Die Werte für den kumulierten Energieaufwand entsprechen jeweils der unteren Grenze der jeweiligen Bewertung

	Kumulierter Energieaufwand (fossil) in MJ/km					
	Straße (Pkw)	Straße (LNF)	Straße (SNF)	Luftfahrt	Schiff	Rückverstromung
+4	0,8	1,0	2,2	84	740	0,7
+3	1,4	1,9	5,2	170	2163	3,1
+2	2,6	3,6	11,3	342	5008	7,9
+1	3,8	5,4	17,3	514	7854	12,7
0	4,9	7,2	23,4	686	10699	17,4
-1	6,1	8,9	29,4	858	13545	22,2
-2	7,3	10,7	35,5	1030	16390	27,0
-3	8,5	12,4	41,5	1202	19235	31,8
-4	9,7	14,2	47,6	1374	22081	36,5
Max.	10,3	15,1	50,6	1460	23504	38,9

### **Kriterium 5: Ursprung des verwendeten CO<sub>2</sub>**

In den vorhergehenden Bewertungen fließt nur indirekt ein, welche CO<sub>2</sub>-Quelle für den Pfad verwendet wird, z. B. über den Energieverbrauch der Abscheidungstechnologie, der sich in der gesamten THG-Bilanz niederschlägt. Dabei wird nicht beachtet, woher das verwendete CO<sub>2</sub> stammt, also ob es sich um eine biogene Quelle, CO<sub>2</sub> aus der Luft oder eine industrielle Punktquelle handelt. Dies wird in diesem Kriterium mit folgenden Unterscheidungen bewertet:

- Die schlechteste Bewertung (-4) würde eine CO<sub>2</sub>-Quelle bekommen, in der fossile Brennstoffe ohne energetische Nutzung verbrannt werden, also der einzige Nutzen des Prozesses die CO<sub>2</sub>-Abscheidung ist.
- Fossile CO<sub>2</sub>-Quellen, welche zusätzlich zur Energiebereitstellung genutzt werden, z. B. CO<sub>2</sub> aus Gas und Dampf (GuD)-Kraftwerken, werden mit -2 bewertet, da hier die Emissionen im Abgas zwar abgeschieden, aber nicht langfristig gespeichert werden. Bei GuD-Kraftwerken handelt es sich außerdem um einen Prozess (Strombereitstellung), der in Zukunft durch klimafreundliche erneuerbare Energien ersetzt werden kann.
- Der Einsatz von vollständig klimafreundlichen Alternativen ist bei manchen industriellen Prozessen, wie der Zementherstellung, hingegen nicht absehbar. Deshalb wird die CO<sub>2</sub>-Quelle aus der Zementherstellung mit 0 bewertet.
- Bei CO<sub>2</sub> aus Müllverbrennungsanlagen wird die Bewertung abhängig vom biogenen Anteil des Mülls zwischen +4 und 0 eingestuft.
- Die beste Bewertung (+4) bekommen CO<sub>2</sub>-Quellen, die einen geschlossenen CO<sub>2</sub>-Kreislauf gewährleisten. Das CO<sub>2</sub> wird also entweder direkt aus der Luft entnommen oder stammt aus biogenen Quellen. Bei dieser Bewertung von biogenen Quellen wird davon ausgegangen, dass Nachhaltigkeits- und THG-Kriterien für die Biomassebereitstellung eingehalten und das gebundene CO<sub>2</sub> anderweitig noch nicht als Gutschrift berücksichtigt wurde.

## **3.6 Akzeptanz**

### ***Allgemeines zur Vorgehensweise***

Auf Basis der Befunde aus den durchgeführten Akteursanalysen, Medienanalysen und Akzeptanzbefragungen (vgl. Kap. 8) wurden zur Bewertung der Akzeptanz folgende drei Bewertungskriterien definiert:

- 1) Kosten / Nutzen
- 2) Umweltwirkungen
- 3) Anwendungstauglichkeit

Die in der Bewertungsmatrix enthaltenen Bewertungen der Kraftstoffpfade hinsichtlich der Akzeptanzkriterien ergeben sich aus der rechnerischen Zusammenführung (Mittelwertbildung) von Bewertungen der übrigen Kriterien (vgl. die Kapitel 3.1 bis 3.5). Jedem der drei Akzeptanzkriterien wurden Kriterien zugeordnet, die auf Daten basieren, die Merkmale der Kraftstoffpfade abbilden, die für das jeweilige Akzeptanzkriterium relevant sind.

**Tabelle 3-16:** Kriterien, die als Berechnungsgrundlage für die Akzeptanzkriterien dienen

Akzeptanzkriterium	Zugeordnete Kriterien (aus den Kapiteln 3.1 bis 3.5)
<b>Kosten / Nutzen</b>	3.1 Differenzkosten des Energiesystems Strukturelle Veränderung des Energiesystems Ausgenutzte Ressourcenpotenziale  3.2 Effizienz der Herstellung Kosten im Jahr 2018 Kosten im Jahr 2030 Kosten im Jahr 2045 Flexibilisierungsoptionen
<b>Umweltwirkungen</b>	3.3 Umwelteigenschaften  3.5 Treibhausgasemissionen 2018 Treibhausgasemissionen 2030 Treibhausgasemissionen 2045 Kumulierter Energieaufwand 2018 Kumulierter Energieaufwand 2030 Kumulierter Energieaufwand 2045 Ursprung des verwendeten CO <sub>2</sub>
<b>Anwendungstauglichkeit</b>	3.3 Energiegehalt Sicherheit, Handhabung Kompatibilität Normen / Regularien Kompatibilität Technik  3.4 Kosten der Fahrzeughaltung Tankvorgang Tankinfrastruktur

Die auf diese Weise erhaltenen Bewertungen stellen mehr eine allgemeine hypothetische Prognose der Akzeptabilität verschiedener synthetischer Kraftstoffe dar. Sie sind weniger als empirisch begründete Aussagen zur tatsächlichen Akzeptanz eines konkreten Kraftstoffpfades zu verstehen. Dies rührt daher, dass das Darstellungsformat der Bewertungsmatrix zwar eine sehr differenzierte Betrachtung der Kraftstoffe und ihrer Herstellungspfade (Akzeptanzobjekte) zulässt, aber für die wichtigen Dimensionen der Akzeptanzsubjekte (unterschiedliche Akteursgruppen) und Akzeptanzkontexte weniger Raum zur Differenzierung bietet. Ergänzend zu den Angaben in der Bewertungsmatrix sind für ein Gesamtbild der Akzeptanzbewertung daher auch die in Kapitel 8 berichteten Ergebnisse zu berücksichtigen (Befunde aus den Online-Befragungen und den Interviews mit Vertreter\*innen von Akteursgruppen).

### **Kriterium 1: Kosten / Nutzen**

Das Kriterium bewertet hauptsächlich die monetären Kosten, aber auch i.w.S. volkswirtschaftliche / gesellschaftliche Kosten / Nutzen-Relationen, die mit der Herstellung und Anwendung der Kraftstoffe verbunden sind. Dabei werden sowohl Kostenstrukturen unter heutigen Bedingungen als auch erwartete zukünftige Kosten berücksichtigt.

### **Kriterium 2: Umweltwirkungen**

Das Kriterium bewertet die mit der Herstellung und Anwendung der Kraftstoffe verbundenen Umweltwirkungen in den Dimensionen / Wirkungsfaktoren THG, Energiebedarf und nicht-THG Emissionen (andere Luftschadstoffe, wie z.B. NO<sub>x</sub>, Feinstaub etc.). Die Herkunft des zur Kraftstoffproduktion erforderlichen CO<sub>2</sub> fließt ebenfalls in die Bewertung mit ein. Neben heutigen Ausprägungen der Umweltwirkungen werden zum Teil auch erwartete zukünftige Verhältnisse berücksichtigt.

### **Kriterium 3: Anwendungstauglichkeit**

Das Kriterium bewertet die Tauglichkeit der Kraftstoffe in der praktischen Anwendung. Referenzmaßstab zur Bewertung der Anwendungstauglichkeit sind heutige Techniken / Technologien (z.B. Motoren / Fahrzeuge), Infrastrukturen (z.B. Tankstellen) und Handlungsrouinen (z.B. Tankverhalten), und die Einschätzung, inwiefern diese angepasst bzw. verändert werden müssten. Weiterhin fließen mit der Anwendung der Kraftstoffe verbundene Risiken (Sicherheit und Handhabbarkeit) mit ein.

## **3.7 Markteinführung**

Im Hinblick auf die Markteinführung synthetischer Kraftstoffe wird mit den hier dargestellten Kriterien und Indikatoren die Notwendigkeit von Markteinführungsmechanismen (MEM) bewertet – bzw. der politische Handlungsbedarf entlang der Wertschöpfungskette. Daraus leiten sich zentrale Erkenntnisse ab, die für die Konstruktion politischer Instrumente notwendig sind.

Die Bewertung erfolgt anhand von drei Kriterien:

- 1) Wie sinnvoll sind MEM aus ökologisch-systemischer Sicht?
- 2) Kann aus nachfrageseitiger Sicht auf MEM verzichtet werden?
- 3) Kann aus angebotsseitiger Sicht auf einen MEM verzichtet werden?

Diesen Kriterien werden die auf Basis einer wissenschaftlichen Dokumentenanalyse erstellten Indikatoren zugeordnet.

### **Kriterium 1: Wie sinnvoll sind MEM aus ökologisch-systemischer Sicht für KS-Pfade?**

Im Kriterium „Wie sinnvoll sind MEM aus ökologisch-systemischer Sicht?“ wird ein Schwerpunkt auf die Ressourceneffizienz gelegt. Dieser wird sowohl systemisch als auch bezogen auf die bei der Herstellung genutzten Ressourcen bewertet. Die Bewertung des Kriteriums ergibt sich als Mittelwert der beiden Indikatoren.

#### **Indikator 1.1: Sinnhaftigkeit von MEM aus systemischer Sicht**

Das Hauptziel eines MEM im Verkehrsbereich sollte die Umsetzung eines THG-neutralen Verkehrssektors sein. Mit diesen beiden Unterindikatoren soll eine Abschätzung getroffen werden,

in welchen Verkehrsbereichen (zumindest vorerst) knappe synthetische Kraftstoffe aus ökologisch-systemischer Sichtweise prioritär eingesetzt werden sollten, um eine möglichst rasche

Reduktion der Treibhausgasemissionen zu erreichen. Die Gesamtbewertung ergibt sich als Mittelwert der Unterindikatoren. Daher wird mit dem ersten Unterindikator zunächst geprüft, für welche Mobilitäts- und Transportbedürfnisse technologische Alternativen zu synthetischen Kraftstoffen bestehen. In einem zweiten Schritt wird der technologische Reifegrad der jeweiligen Alternative geprüft. Ein Überblick über die für diesen Indikator verwendeten Annahmen für die betrachteten Verkehrsbereiche findet sich in Tabelle 3-17.

**Tabelle 3-17:** Beschreibung der Eignung und des technischen Stands der Alternativen zu synthetischen Kraftstoffen

Bereich	Bewertung
Pkw	Im Bereich PKW bestehen bereits voll entwickelte Alternativen mit batterieelektrischen Fahrzeugen. Der ADAC Ecotest hat hier Reichweiten von 100 km (Smart Forfour EQ passion) bis 610 km (BMW iX xDrive 50) ermittelt, wobei eine Reichweite von um die 300-400 km, die für Überlandfahrten ausreichend ist, von vielen heutigen Modellen bereits erreicht wird (TRL 9) [Wieler 2022]. Der aktuelle Effizienzrekord liegt beim Prototyp Mercedes-Benz VISION EQXX, der im Juni 2022 eine Strecke von 1202 km absolvierte [Mercedes-Benz 2022]. Theoretisch betrachtet, ist es aus heutiger Sicht deshalb möglich, die meisten Mobilitäts- und Transportbedürfnisse im Bereich Pkw mit alternativen Antrieben abzudecken.
LNF	Im Bereich leichte Nutzfahrzeuge (LNF) gibt es auch bereits Modelle in unterschiedlichen Größenklassen mit mehr als 300 km Reichweite nach Herstellerangabe (Opel Combo-e Cargo, Opel Vivaro-e Cargo, Ford E-Transit Kastenwagen 350 L2) [Hommen 2022]. Die Reichweiten sind hier bisher noch geringer als im Pkw-Bereich, dennoch sind die Fahrzeuge voll ausgereift (TRL 9). Es ist auch hier nach theoretischen Überlegungen aus heutiger Sicht möglich, alle Mobilitäts- und Transportbedürfnisse abzudecken.
SNF	Im Schwerlastverkehr (SNF) werden höhere Reichweiten benötigt, weshalb hier Brennstoffzellen-Lkw neben batterieelektrischen Lkw für kürzere Strecken als Option gelten. Ein voll-entwickeltes Modell eines Brennstoffzellen-Lkw ist mit dem Hyundai Xcient Fuel Cell mit 400 km Reichweite nach Hersteller bereits auf dem Markt [Hyundai] und von Quantron wurde das Modell FCEV 44-2000 vorgestellt, welches bis zu 1.500 km Reichweite besitzen soll [Quantron 2022]. Die Verfügbarkeit von Wasserstoff-Tankstellen ist allerdings mit einer Anzahl von 92 (Stand 2021) noch nicht ausreichend [Statista 2021]. Insgesamt TRL 7. Es ist aus heutigen theoretischen Überlegungen vorstellbar, dass alle Mobilitäts- und Transportbedürfnisse im Bereich schwere Nutzfahrzeuge mit alternativen Antrieben abgedeckt werden können.

Bereich	Bewertung
Schifffahrt	In der Schifffahrt ist der Entwicklungsstand von alternativen Technologien wie der Schifffahrt mit Wasserstoffantrieb sehr unterschiedlich. Es gibt voll entwickelte Alternativen für geringe Größen und kürzere Strecken, wie die MF Hydra-Fähre in Norwegen, die zwischen Hjelmeland, Skipavik und Nesvik verkehrt [FuelCellsWorks 2021b]. Der Bau einer größeren Fähre wird mit der Europa Seaways von Dänemark und Norwegen angekündigt und soll 2027 fertiggestellt werden [Morgan 2020]. Die TRL befindet sich deshalb zwischen 3 und 9 auf einem weiten Spektrum. Bezüglich der Abdeckung der Nutzungsprofile lässt sich festhalten, dass selbst bei optimistischen Annahmen eine Abdeckung von mehr als 50 % der Profile nur mit geringer Ladung oder Zwischenstopps, die die Fahrzeit verlängern, möglich ist [Mao et al. 2020].
Luftfahrt	In der Luftfahrt reicht der Entwicklungsstand von alternativen Technologien weitgehend im Bereich von Versuchsaufbauten im Labor, wie bei der Entwicklung von Airbus-Wasserstoffflugzeugen [Airbus 2022c], bis hin zu einem Prototyp, der vom DLR für ein Kleinflugzeug erfolgreich realisiert wurde [DLR 2018]. Die TRL befindet sich deshalb zwischen 4 und 6. Nach dem Projekt EXACT (Exploration of Electric Aircraft Concepts and Technologies) wäre eine Realisierung erster Flugzeuge mit 2.800 km Reichweite und 250 Sitzen ab ca. dem Jahr 2035 möglich [Grimme 2021]. Dies würde nach ICCT nach Reichweite und Kerosinverbrauch ca. die Hälfte des Kerosinverbrauchs aus Passagierflügen ersetzen können <sup>8</sup> .

#### Unterindikator 1.1.1: Reifegrad alternativer Technologien (gemessen mit dem Technology Readiness Level (TRL))

Neben der Abdeckung der Nutzungsprofile ist auch der technologische Reifegrad der alternativen Technologie entscheidend für deren Potenzial zur Treibhausgasreduktion. Der Unterindikator orientiert sich dabei an der Skala für den Technologiereifegrad (engl. Technology Readiness Level (TRL)). Da der Reifegrad sich je nach Anwendungsprofil im Verkehrsbereich unterscheiden kann, fließt der Mittelwert der Spanne an Reifegraden in die Bewertung ein. Ist die alternative Technologie in ihrem Technologiestand kaum fortgeschritten (TRL 1), so besteht eine hohe Notwendigkeit für synthetische Kraftstoffe und deren MEM und es wird eine +4 vergeben. Ist die alternative Technologie bereits voll entwickelt (TRL 9) besteht keine Sinnhaftigkeit für synthetische Kraftstoffe und deren MEM und es wird eine -4 vergeben.

<sup>8</sup> Quelle: [Graver et al. 2020] unter Annahme einer Proportionalität von CO<sub>2</sub>-Ausstoß und Kerosinverbrauch.



### Unterindikator 1.1.2: Eignung alternativer Technologien, die Mobilitäts- und Transportbedürfnisse in Zukunft zu erfüllen

Mit diesem Unterindikator soll abgeschätzt werden, in welchen Verkehrsbereichen eine hohe Energiedichte, wie sie von synthetischen Kraftstoffen geboten wird, zwingend benötigt wird und die Anwendung deshalb nicht durch Alternativen, wie batterieelektrische oder Wasserstofffahrzeuge abgedeckt werden kann. Die Beurteilung der Abdeckung unterschiedlicher Nutzungsprofile im betreffenden Verkehrsbereich wird auf Basis von bereits vorhandenen Anwendungen, sowie Studien und der Expertise aus dem Forschungsverbund mittels theoretischer Überlegungen durchgeführt. Der Maximal- bzw. Minimalwert ist wie folgt definiert: Wenn keine Nutzungsprofile mit einer alternativen Technologie abgedeckt werden können, so wird der Unterindikator mit +4 bewertet (MEM sinnvoll). Wenn alle Bereiche mit einer alternativen Technologie abgedeckt werden können, sind MEM für den betrachteten synthetischen Kraftstoff nicht sinnvoll und in diesem Unterindikator wird eine -4 vergeben.

### Indikator 1.2: Sinnhaftigkeit eines MEM zum Schutz der Ressourcen

Der Schutz der Ressourcen kann neben einer systemischen Betrachtung auch konkret am Wirkungsgrad und der stofflichen Nutzung festgemacht werden. In diesen Indikator fließen deshalb verschiedene Unterindikatoren unter gleicher Gewichtung ein. Es wird der Wirkungsgrad des Herstellungsverfahrens, der C-Ausnutzungsgrad, sowohl im Zielfuel als auch für die Summe der Elemente, und der Flächenverbrauch im Vergleich zur bestehenden installierten Leistung an erneuerbaren Energien im Jahr 2021 in Deutschland berücksichtigt. Ziel ist es, eine Unterscheidung zu treffen, welcher Pfad unter Annahme vernachlässigbarer Unterschiede bei der Ressourcennutzung der Anwendung den geringsten Ressourcenverbrauch besitzt und damit im Vergleich der betrachteten synthetischen Kraftstoffe den ressourcenärmsten Kreislaufprozess darstellt. Damit soll aus ökologisch-systemischer Sicht eine Empfehlung für die Sinnhaftigkeit von MEM für einen Kraftstoffpfad gegeben werden. Die Gesamtbewertung des Indikators ergibt sich als Durchschnitt der Bewertungen der Unterindikatoren.

#### Unterindikator 1.2.1: Wirkungsgrad der Herstellung

Wie im Kapitel 3.2 Kriterium 1 bereits erläutert, gibt der Wirkungsgrad der Herstellung an, wie viel Strom für eine Menge an synthetischem Kraftstoff aufgewendet wird. Damit kann beurteilt werden, wie viel Energie für den Kraftstoff-Kreisprozess erforderlich ist. Ist dieser Aufwand gering und der Wirkungsgrad über 90 %, so sind MEM sinnvoll und der Pfad wird mit +4 bewertet. Liegt die Effizienz unter 10 % wird der Pfad mit -4 bewertet.

#### Unterindikator 1.2.2: C-Ausnutzungsgrad im Zielfuel

Der C-Ausnutzungsgrad bei der Herstellung für den Zielkraftstoff wird ebenfalls bereits im Kapitel 3.2 Kriterium 1 beschrieben. Es ist ein wichtiges Kriterium zur Beurteilung der stofflichen Ausnutzung im Kreisprozess. Liegt die Ausnutzung über 90 %, wird der Kraftstoffpfad mit einer +4 bewertet, liegt die Ausnutzung unter 10 %, erhält der Pfad eine -4.

### Unterindikator 1.2.3: C-Ausnutzungsgrad für die Summe der Elemente

Der C-Ausnutzungsgrad bei der Herstellung für die Summe der Elemente wird ebenfalls bereits im Kapitel 3.2 Kriterium 1 beschrieben. Dieser Indikator bildet ebenfalls einen Aspekt der Ressourcennutzung ab. Er wird strenger bewertet, da hier die komplette Summe der Elemente betrachtet wird. Hier wird ein Ausnutzungsgrad von 100 % mit +4 bewertet und ein Ausnutzungsgrad von unter 60 % mit -4.

### Unterindikator 1.2.4: Flächenverbrauch bzw. notwendige zusätzliche installierte Leistung an Erneuerbaren Energien im Vergleich zum aktuellem Ausbaustand

Beim Flächenverbrauch wird ein Vergleich mit der bisher genutzten installierten Leistung durchgeführt. Für jeden Kraftstoffpfad wird die zu installierende Leistung pro TWh Kraftstoff berechnet und als Anteil der installierten Leistung Deutschlands im Jahr 2021 ausgegeben. Die installierte Leistung wird aus dem Strommix für das Jahr 2045 aus den BEniVer-Rahmenannahmen für 8.000 h und dem Kapazitätsfaktor für das entsprechende Jahr berechnet. Aufgrund der Proportionalität wird der Maßstab stellvertretend an der Offshore-Windenergie gemessen. Aufgrund der nicht erweiterbaren Fläche und der bereits heute bestehenden Flächenkonkurrenzen beginnt die Skala hier bei 0, da es sich stets um eine zusätzliche Flächeninanspruchnahme (die noch zu den Bedarfen für die Stromversorgung an sich hinzugerechnet werden muss) handelt. Ein Wert von unter 0,5 % pro TWh Kraftstoff<sup>9</sup> ergibt eine 0, ein Wert von über 1,25 % pro TWh Kraftstoff ergibt eine -4, was bei 100 TWh jeweils einer zusätzlich zu installierenden Leistung von 50 % bis 125 % entspricht.

### Gesamtbewertung Kriterium 1:

Die Indikatoren „Sinnhaftigkeit von MEM aus systemischer Sicht“ und „Sinnhaftigkeit von MEM zum Schutz der Ressourcen“ werden gleich gewichtet und ergeben die Gesamtbewertung für das Kriterium 1. Dabei sind verschiedene Kombinationen möglich. So ist die Sinnhaftigkeit für MEM für einen synthetischen Kraftstoff ohne systemische Notwendigkeit und mit sehr hohem Ressourcenverbrauch am geringsten und MEM dafür am wenigsten sinnvoll (Bewertung -4). Umgekehrt besteht die größte Sinnhaftigkeit für MEM für synthetische Kraftstoffe mit hoher systemischer Notwendigkeit und sehr geringem Ressourcenverbrauch (Bewertung +4). In der Mitte der Skala sind synthetische Kraftstoffe mit gegensätzlichen Bewertungen zu finden, sodass MEM nur evtl. sinnvoll sind (Bewertung 0). Dies können entweder synthetische Kraftstoffe mit hohen systemischen Notwendigkeiten bei hohen Ressourcenverbräuchen oder mit geringen systemischen Notwendigkeiten bei geringen Ressourcenverbräuchen sein.

### **Kriterium 2: Kann aus nachfrageseitiger Sicht auf MEM für KS-Pfade verzichtet werden?**

Mit diesem Kriterium werden die Kraftstoffpfade im Hinblick auf ihre nachfrageseitigen Implikationen untersucht, um die Notwendigkeit von MEM zu bewerten. Diese wird als Mittelwert aus der Veränderung der Kosten von privaten Haushalten (Verwendungsseite) und Produktion

---

<sup>9</sup> Dieser Wert ist angelegt an den der Elektromobilität, welcher bei ca. 0,35 % / TWh (Annahme: mit 90 % Wirkungsgrad in der Anwendung und 12 % Verlust beim Laden und 40 % Effizienz für Verbrennungsmotor) liegt.

(Entstehungsseite) berechnet. Die Berechnungen hierfür basieren auf Werten aus der volkswirtschaftlichen und der umweltökonomischen Gesamtrechnung, mit deren Hilfe abgeschätzt wird, welche zusätzlichen Kosten, einerseits für Haushalte und andererseits für Unternehmen, entstünden, wenn ein bestehender Kraftstoff vollständig durch einen synthetischen Kraftstoff ersetzt würde. Im Folgenden wird diese Berechnungsmethode detailliert dargestellt.

Eine Abbildung der Produktion und der Endverbraucher bietet die Input-Output-Tabelle für die inländische Produktion und die Importe aus der volkswirtschaftlichen Gesamtrechnung des Statistischen Bundesamtes. Diese Tabelle umfasst die gesamte Produktion der deutschen Unternehmen. Die Gliederung erfolgt nach Produktionsbereichen, aus denen neben einer Belastung der Gesamtwirtschaft und der privaten Haushalte in der Vorleistungsverflechtungsmatrix auch Belastungen der einzelnen Produktionsbereiche entnommen werden können. Dabei wird die Nachfrage der einzelnen Akteursgruppen nach der Gütergruppe Nummer 12 „... Mineralölzeugnisse“ als Ausgangspunkt herangezogen. Zur Berechnung der Anteile des damit verbundenen Inputs von Verkehrsträgern in den einzelnen Produktionsbereichen am Mineralölverbrauch bietet sich ein Vergleich mit der umweltökonomischen Gesamtrechnung an. Die Produktionsbereichsdefinition und -zuordnung stimmt mit der Input-Output-Tabelle der volkswirtschaftlichen Gesamtrechnung überein, allerdings mit einem geringeren Detaillierungsgrad in der umweltökonomischen Gesamtrechnung. Deshalb wird aufgrund der fehlenden Datenbasis angenommen, dass die Anteile der Verkehrsträger über die zusammengefassten Produktionsbereiche gleichbleiben. Durch die Wahl dieser Berechnungsmethode wird angenommen, dass der Kraftstoff – unabhängig von seiner Produktion im In- oder Ausland – vollständig durch den synthetischen Kraftstoff des betreffenden Pfades für den jeweiligen Produktionsbereich ersetzt wird. Zur Berechnung werden jeweils die Datenwerte aus dem Jahr 2018 entnommen. Die einzelnen Schritte der Berechnung sind dabei wie folgt:

1. Zunächst wird für jeden Kraftstoffpfad das Kostenverhältnis zum fossilen Kraftstoff berechnet. Dieses ist der Quotient aus den Herstellungskosten für den synthetischen Kraftstoff in €/GJ und fossilem Kraftstoff €/GJ, beide für das Jahr 2018. Die Herstellungskosten für fossilen Kraftstoff werden aus den MKS-Pfaden entnommen. Die Vergleichspfade sind für die Verkehrsbereiche in Tabelle 3-18 dargestellt:

**Tabelle 3-18:** Vergleichspfade für Kostenverhältnisbestimmung

Verkehrsbereich	Vergleichspfad
Pkw	MKS_Ö_Benzin_#1
LNF	MKS_Ö_Diesel_#1
SNF	MKS_Ö_Diesel_#1
Schifffahrt	MKS_Ö_Diesel_#1
Luftfahrt	MKS_Ö_Kerosin_#1

2. Im zweiten Schritt werden für die Produktionsbereiche jeweils aus der Verkehrs- und Kraftstoffstatistik der umweltökonomischen Gesamtrechnung des Statistischen Bundesamtes die Anteile der Verkehrsträger des Straßenverkehrs am Mineralölverbrauch berechnet. Der Anteil für Heizöl wird dem Wärmebereich zugeordnet. Für den Bereich Schifffahrt wird vereinfachend angenommen, dass dieser lediglich im Produktionsbereich Schifffahrtsleistungen einen Beitrag besitzt.
3. Im dritten Schritt werden für jeden Produktionsbereich die geänderten Kosten für den Mineralölkonsum (Input aus dem Produktionsbereich Mineralöl- und Kokereiprodukte) bestimmt. Für den Bereich „Roheisen, Stahl, Erzeugnisse der ersten Bearbeitung“ wird zur Vereinfachung angenommen, dass der Input des Produktionsbereichs Mineralöl- und Kokereiprodukte vollständig dem Bereich Kokereiprodukte zugeordnet ist und hier keine Kostenänderung stattfindet. Dies lässt sich mit den hohen Bedarfen an Koks in der Stahlerzeugung begründen. Für die anderen Produktionsbereiche wird angenommen, dass der Anteil der Kokereiprodukte vernachlässigbar ist.
4. Für die privaten Haushalte werden die Schritte 1 bis 3 analog durchgeführt. Hier sind lediglich Anteile von Pkw und leichten Nutzfahrzeugen festzustellen.
5. Für jeden Produktionsbereich wird der Anteil am Produktionswert und an der Bruttowertschöpfung berechnet.
6. Für die privaten Haushalte wird der Anteil an den Konsumausgaben berechnet.

Mit den ersten sechs Schritten wurde der Fall bestimmt, in dem die geänderten Kosten der Unternehmen nicht weitergegeben werden. Im Falle einer Kostensteigerung bedeutet das eine direkte Minderung des Gewinns. Die Haushalte werden dann lediglich mit höheren direkten Konsumausgaben für Kraftstoffe belastet.

7. Im folgenden Schritt wird die vollständige Weitergabe der veränderten Kosten der Produktionsbereiche berechnet. Dazu wird der Produktionswert jedes Produktionsbereichs um die entsprechende Kostenänderung verändert. Im Falle einer Kostensteigerung, werden die privaten Haushalte als Endverbrauchende hierdurch mit weiteren erhöhten Konsumausgaben im Nicht-Energiebereich belastet. Somit wird in diesem Schritt die erste Folgerunde der Preiserhöhung unter Annahme vollständiger Kostenweitergabe berechnet. Weitere Folgerunden werden nicht berücksichtigt, da hierfür Annahmen zu den Reaktionen von Unternehmen und Verbrauchenden (neue Produktionsprozesse, Verhaltensänderungen, Energiesparen etc.) getroffen werden müssten.
8. Für alle Produktionsbereiche wird die Kostenänderung an der Bruttowertschöpfung berechnet.

Mit den Schritten 7 und 8 wird nur die Kostenänderung der Weitergabe berechnet. Zur Berechnung der Gesamtkostenänderungen werden die Ergebnisse ohne Kostenweitergabe (erste 6 Schritte) und nur die Kostenänderung über alle Produktionsbereiche summiert.

Diese Berechnung hat nicht das Ziel einer vollständigen Abschätzung der makroökonomischen Wirkungen einer Kraftstoffsubstitution. Dafür wären komplexe Modelle erforderlich. Vielmehr geht es um die Einschätzung, welche ökonomische Größenordnung der Impuls einer Einführung synthetischer Kraftstoffe erreichen kann.

### Indikator 2.1: Veränderung der Ausgaben der privaten Haushalte gemessen an den Konsumausgaben

Die Veränderungen der Kosten für die privaten Haushalte, die nach oben beschriebener Methode berechnet wurden, werden an den Konsumausgaben der privaten Haushalte vor der Veränderung gemessen. Hierfür wird der Quotient gebildet. Sinken die Kosten um über 3,75 % im Vergleich zu den Konsumausgaben, wird eine +4 vergeben (auf MEM kann verzichtet werden und es ist anzunehmen, dass die Nachfrage durch den geringeren Preis hoch ist). Steigen die Kosten um über 3,75 % wird eine -4 (MEM notwendig) vergeben. Bei einer Wertung von 0 sind MEM aus Nachfragesicht der Konsumierenden ebenfalls nicht notwendig.

### Indikator 2.2: Veränderung der Produktionskosten

Hier werden die Veränderungen der Kosten, die wie zuvor beschrieben berechnet wurden, für die Summe der Produktionsbereiche berechnet und durch die Bruttowertschöpfung geteilt, um einen Maßstab für die Belastung der Produktion durch die Kostensteigerungen zu erhalten. Sinken die Kosten um über 3,75 % im Vergleich zur Bruttowertschöpfung, wird eine +4 vergeben (auf MEM kann verzichtet werden und es ist anzunehmen, dass die Nachfrage durch den geringeren Preis hoch ist). Steigen die Kosten um mehr als 3,75 % im Vergleich zur Bruttowertschöpfung wird eine -4 vergeben (MEM notwendig). Bei einer Wertung von 0 sind MEM aus Nachfragesicht der Produktion ebenfalls nicht notwendig.

### Gesamtbewertung Kriterium 2

Für das Kriterium 2 wird der Durchschnitt der Unterkriterien gebildet. D.h. sinken die Gesamtkosten um über 3,75 %, wird eine +4 vergeben (auf MEM kann verzichtet werden und es ist anzunehmen, dass die Nachfrage durch den geringeren Preis hoch ist). Steigen die Kosten um mehr als 3,75 %, wird eine -4 vergeben (MEM notwendig). Bei einer Wertung von 0 sind MEM ebenfalls nicht notwendig.

### **Kriterium 3: Kann aus angebotsseitiger Sicht auf MEM für KS-Pfade verzichtet werden?**

In diesem Kriterium werden die Kraftstoffpfade im Hinblick auf ihre Infrastruktur-Implicationen untersucht, um die Notwendigkeit von MEM für diesen Bereich zu bewerten. Dabei geht es um die Bewertung der Kompatibilität der Kraftstoffpfade mit bestehender Infrastruktur und möglicher Notwendigkeiten ihres Aus- und Umbaus. Dabei liegt der Fokus ausschließlich auf der direkt den Kraftstoffpfad betreffenden Infrastruktur, d.h. indirekte Wirkungen auf andere Infrastrukturbereiche werden an dieser Stelle nicht berücksichtigt. Die Bewertung des Indikators erfolgt als Mittelwert der drei folgenden Unterindikatoren.

### Indikator 3.1: UPSTREAM

Im Upstreambereich geht es um die Infrastruktur zur Herstellung. Hier wird beurteilt, wie hoch der Aufwand einer neuen oder geänderten Herstellungsinfrastruktur (Raffinerien, C-Quelle, H-Quelle) für den betreffenden Kraftstoff im Kraftstoffpfad ist und ob sich im Herstellungsprozess weitere Nebenprodukte mit einem hohen Bedarf ergeben.

### Unterindikator 3.1.1: Kompatibilität des Kraftstoffpfads mit bestehender Infrastruktur zur Herstellung

Zur Beurteilung der Infrastruktur zur Synthese der Kraftstoffpfade werden sowohl die Anzahl der hintereinander geschalteten Prozesse als auch der durchschnittliche Kommerzialisierungsgrad der Prozessschritte beurteilt. Wird lediglich ein Prozessschritt benötigt, wird dies mit einer 0 bewertet (MEM evtl. notwendig); werden fünf Prozessschritte benötigt, wird eine -4 vergeben (MEM notwendig).

Der Kommerzialisierungsgrad wird in 4 Stufen von 0 (bisher keine nennenswerten Demonstratoren von F&E Projekten) bis 3 (größerer Anteil am Markt bei der Herstellung für das Produkt des Einzelprozesses), siehe Tabelle 3-19, eingeteilt. Ein Kommerzialisierungsgrad von 0 ergibt eine Bewertung von -4 (MEM notwendig); ein Kommerzialisierungsgrad von 3 eine +4 (auf MEM kann verzichtet werden). Der Kommerzialisierungsgrad der Einzelprozesse ist in Tabelle 3-20 dargestellt (die Definition für die Kommerzialisierungsgrade findet sich dazu in Tabelle 3-19). Die Basis für die Bewertung bildet eine wissenschaftliche Dokumentenanalyse.

Die Gesamtbewertung ergibt sich als Mittelwert aus der Anzahl der Prozessschritte und dem Kommerzialisierungsgrad und zählt für diesen Unterindikator zu 75 % in die Bewertung des Upstream-Indikators.

**Tabelle 3-19:** Stufen des Kommerzialisierungsgrades

Kommerzialisierungsgrad	Beschreibung
0	Bisher keine nennenswerten Demonstratoren von F&E-Projekten
1	Demonstratoren
2	Kommerzielle Nutzung
3	Größerer Anteil am Markt bei Herstellung für Endprodukt des Einzelprozesses

**Tabelle 3-20:** Kommerzialisierungsgrad für Einzelprozesse

Prozess	Kommerzialisierungsgrad	Beschreibung
Methanisierung	1	Einige Forschungs- und Entwicklungsstandorte, noch nicht kommerziell verfügbar [DVGW]
FT-Synthese	3	Ist kommerziell verfügbar und es gibt eine großskalige Produktion seit der zweiten Hälfte des 20. Jahrhunderts [Dieterich et al. 2020]
Methanol-synthese	3	Schon seit 1923 mit Hochdruckverfahren, ab 1960-ern im Niederdruckverfahren kommerziell betrieben [Dieterich et al. 2020]. Es besteht weltweit ein hoher Bedarf an Methanol von über 78 Mio. t pro Jahr (2018) [Argus 2018a].
Methanol-to-Olefins (MtO)	3	Erste MTO Anlage nahm 2010 den Betrieb in China auf [Tian et al. 2015]. Mittels MtO/MtP (Methanol-to-Propylene) wurden 2018 weltweit über 10 Mio. t verarbeitet [Argus 2018a].
Methanol-to-Gasoline (MtG)	3	Kommerziell verfügbar. Weltweit werden über 19 Mio. t. pro Jahr mittels dieses Prozesses verarbeitet [Argus 2018a].
Methanol-to-Jet (MtG)	0	Bisher nicht kommerziell verfügbar, ExxonMobil entwickelt diese Technologie [ExxonMobil 2022]. Im Forschungsverbund KEROSyn100 ist eine großtechnische Anlage mit dem Prozess der Chemieanlagenbau Chemnitz GmbH (CAC-Synfuel) geplant [CAC].
Methanol-to-OME	0	Der Prozess Methanol zu OME ist bisher nicht kommerziell genutzt und war 2019 noch in der Entwicklung [Burre et al. 2019].
Methanol-to-DMC	3	Die Gewinnung von Mefo aus Methanol ist kommerziell verfügbar und es gibt eine industrielle Produktion. Es wird in der Gießerei als Bindemittel eingesetzt [BASF]. Auf industrieller Ebene wird Mefo über Carbonylierung von Methanol und Kohlenstoffmonoxid hergestellt [Kaiser et al. 2021].
Methanol-to-Mefo	3	DMC wird bereits industriell hergestellt und u. a. als Elektrolyt in der Lithium-Batterie-Produktion eingesetzt [UBE]. DMC wird aus CO <sub>2</sub> und Methanol produziert, welches den Pfad der Umsetzung von Methanol mit hochtoxischem Phosgen abgelöst hat [Abdalla und Liu 2018].
DME-Synthese aus Methanol	3	Die meisten bestehenden kommerziellen Anlagen gehen über die Methanolroute und nicht über Synthesegas [Dieterich et al. 2020].

Prozess	Kommerzialisierungsgrad	Beschreibung
DME-Synthese direkt aus Synthesegas	0	Die meisten bestehenden kommerziellen Anlagen gehen über die Methanolroute und nicht über Synthesegas [Dieterich et al. 2020].
Ethanol-Synthese	0	Wird hauptsächlich biobasiert durch alkoholische Gärung gewonnen. An der Gewinnung aus Synthesegas wird geforscht, hier gibt es unterschiedliche Produktionsrouten [Kang et al. 2020].
Weitere Ethanolveredelung	0	Bisher keine industriellen Anwendungen [Luk et al. 2017].
Alkalische Elektrolyse	3	Hat große Marktanteile bei der Elektrolyse von Wasserstoff [IEA 2021c]
PEM-Elektrolyse	3	Hat große Marktanteile bei der Elektrolyse von Wasserstoff [IEA 2021c]
SOEC	2	Keine signifikanten Marktanteile [IEA 2021c]
Co-SOEC	2	Kommerziell verfügbar, hier gibt es eine Anlage von Sunfire [Sunfire 2021]
Synthesegasherstellung (H <sub>2</sub> +CO)	2	Anlage von Airproducts [Air Products GmbH]. Plasmalyse wird ebenfalls kommerziell angeboten [Graforce]. Die Synthesegasproduktion wird durch Kohlevergasung und der Dampfreformierung aus Erdgas dominiert.
Direct Air Capture (DAC)	2	2017 wurde die erste kommerzielle DAC-Anlage von Climeworks installiert [Climeworks 2017]. Bis November 2021 sind 19 DAC Anlagen weltweit in Betrieb mit 0,01 Mt CO <sub>2</sub> /Jahr [IEA 2022c]. Die Kapazität ist damit deutlich geringer als bei CCUS.
CCUS	3	2021 gab es CCUS mit Gesamtkapazität von 43,7 Mt CO <sub>2</sub> pro Jahr [IEA 2021e]
Luftzerlegung zur Stickstoffgewinnung	3	Allein Air Liquide betreibt 500 Luftzerlegungsanlagen in 60 Ländern [Air Liquide 2023].
Haber-Bosch-Synthese	3	Ist das industrielle Verfahren, mit dem weltweit Ammoniak gewonnen wird [UBA 2022d].



Unterindikator 3.1.2: Bedarf an Koppelprodukten der Herstellung

Für die Koppelprodukte der Kraftstoffpfade wird mittels wissenschaftlicher Dokumentenrecherche der Bedarf abgeschätzt und zur Darstellung der großen Spanne bei den Bedarfen in einer logarithmischen Skala bewertet. Ein mittlerer weltweiter Bedarf von über 10.000 EJ für das Nebenprodukt wird mit einer -4 bewertet, ein weltweiter Bedarf von weniger als 1 EJ pro Jahr oder wenn kein Nebenprodukt vorhanden ist, wird mit einer +4 bewertet. Die obere Schwelle von 10.000 EJ orientiert sich dabei an den bisher meist verwendeten Kraftstoffen Benzin und Diesel. Die Bedarfe nach Koppelprodukten sind in Tabelle 3-21 dargestellt. Dieser Unterindikator fließt zu einem Anteil von 25 % in die Bewertung des Upstream-Indikators ein.

**Tabelle 3-21:** Weltweite Bedarfe für ausgewählte Koppelprodukte

Koppelprodukt	Weltweiter Bedarf	Quellen
Methanol	>1.000 EJ	[Argus 2018a]
LPG	>10.000 EJ	[Argus 2018b]
Benzin	>10.000 EJ	[UNdata 2022b]
Kerosin	>10.000 EJ	[UNdata 2022a]
Ethanol	>1.000 EJ	[U.S. Department of Energy]
Methan / Erdgas	>100.000 EJ	[IEA 2022d]
Wachse	>100 EJ	[UNdata 2022c]

Indikator 3.2: MIDSTREAM: Kompatibilität des Kraftstoffpfads mit bestehender Infrastruktur zum Transport und zur Betankung

In diesem Kriterium wird die Infrastruktur zur Verteilung (Pipelines, Tankschiffe, Tankwagen, Tankstellen) analog zum Kriterium im Kapitel 3.4 unter Tankinfrastruktur bewertet. Ist bereits eine Tankinfrastruktur vorhanden, so wird dies mit einer +4 bewertet (auf MEM kann verzichtet werden); muss eine komplett neue Infrastruktur mit hohem Investitionsaufwand aufgebaut werden, wird dieses mit einer -4 bewertet (MEM notwendig).

Indikator 3.3: DOWNSTREAM: Kompatibilität des Kraftstoffpfads mit der Fahrzeugnutzung

Der Downstreambereich betrifft die Fahrzeugnutzung (Straßenfahrzeuge inkl. PKW und LKW, Schiffe, Flugzeuge). Hier wird einerseits bewertet, wie kompatibel der Kraftstoff technisch mit der bestehenden Fahrzeugflotte ist, und andererseits, inwieweit der Kraftstoff mit den bestehenden Normen und Regularien vereinbar ist. Die Gesamtbewertung ergibt sich als Mittelwert.

Unterindikator 3.3.1: Kompatibilität des Kraftstoffpfads mit der bestehenden Fahrzeugflotte

In die Bewertung der Kompatibilität mit der bestehenden Fahrzeugflotte fließt ein, inwieweit bereits bestehende Fahrzeuge mit dem Kraftstoff des betreffenden Kraftstoffpfades kompatibel sind und wie aufwändig die Umrüstung der Fahrzeugflotte wäre, um den Kraftstoff zu nutzen oder ob es komplett neuer Fahrzeuge hierfür benötigt. Wird keine Umrüstung benötigt, wird dies mit einer +4 bewertet (auf MEM kann verzichtet werden). Muss dagegen eine komplett neue Fahrzeugflotte aufgebaut werden, wird dies mit einer -4 bewertet (MEM notwendig).

Unterindikator 3.3.2: Kompatibilität des Kraftstoffpfads mit bestehenden Normen / Regularien

Zur Bewertung der Vereinbarkeit mit Normen und Regularien wird das Kriterium 4 Kompatibilität im relevanten Sektor hinsichtlich Normen / Regularien aus Kraftstoffnutzung verwendet. Die Bewertung erfolgt komplementär, da eine Nichtvereinbarkeit MEM bedingt (+4).

Gesamtbewertung Kriterium 3:

Die genannten Unterkriterien „Upstream“, „Midstream“ und „Downstream“ werden gleich gewichtet und ergeben so eine Gesamtbewertung für das Kriterium 3, inwiefern der betreffende Kraftstoff mit der bestehenden Infrastruktur kompatibel ist. Bei voller Kompatibilität wird der Kraftstoff mit +4 bewertet (auf MEM kann verzichtet werden). Muss die komplette Infrastruktur von der Herstellung bis zur Anwendung aufwendig neu errichtet werden, dann ergibt sich eine -4 (MEM notwendig).

## 4 Bewertung der generischen Referenzpfade für synthetische Kraftstoffe

In Kapitel 4.1 bis 4.7 wird detailliert auf die Bewertungen in den sieben Bewertungskategorien

- Integration ins Energiesystem
- Techno-ökonomische Bewertung der Herstellung
- Kraftstoffnutzung
- Integration ins Verkehrssystem
- Ökologische Bewertung
- Akzeptanz
- Markteinführung

eingegangen. Daraus werden entsprechende Schlussfolgerungen für den Vergleich der generischen Referenzpfade abgeleitet.

**Tabelle 4-1:** Bewertung der generischen Referenzpfade für synthetische Kraftstoffe

		Differenzkosten des Energiesystems	Strukturelle Veränderung des Energiesystems	Ausgenutzte Ressourcenpotenziale	Effizienz der Herstellung	Kosten im Jahr 2018	Kosten im Jahr 2030	Kosten im Jahr 2045	Flexibilisierungsoptionen	Umwelteigenschaften	Energieinhalt	Sicherheit, Handhabung (inkl. Haltbarkeit und Lagerfähigkeit)	Kompatibilität Normen / Regularien	Kompatibilität Technik	Kosten der Fahrzeughaltung	Tankvorgang	Tankinfrastruktur	THG-Emissionen 2018	THG-Emissionen 2030	THG-Emissionen 2045	Kumulierter Energieaufwand 2018	Kumulierter Energieaufwand 2030	Kumulierter Energieaufwand 2045	Ursprung des verwendeten CO <sub>2</sub>	Kosten / Nutzen	Umweltwirkungen	Anwendungstauglichkeit	Ökologisch-systemische Notwendigkeit von MEM	Nachfrageseitige Notwendigkeit von MEM	Angebotsseitige Notwendigkeit von MEM
Pfadname	Fokus-Verkehrsbereich	Integration ins Energiesystem			Techno-ökonomische Bewertung der Herstellung				Kraftstoffnutzung					Integration ins Verkehrssystem			Ökologische Bewertung						Akzeptanz		Markteinführung					
GEN_Ammoniak_#1	Schiff	k.A.	k.A.	k.A.	0	-1	0	+2	k.A.	+2	-2	-1	-3	-3	-2	+1	-2	-2	+3	+4	+1	+3	+4	k.A.	0	+3	-2	+1	-1	-2
GEN_Benzin_#1	Straße (Pkw)	+3	0	0	-1	-2	-1	+1	k.A.	-1	+2	0	+4	+4	-4	+4	+4	-3	+2	+3	-4	+1	+3	0	0	0	+2	-3	-3	+3
GEN_Diesel_#1	Straße (SNF)	+3	0	0	-1	-2	-1	+1	k.A.	0	+2	+1	+3	+3	-3	+4	+2	-4	+3	+4	-3	+2	+4	0	0	+1	+2	-2	-2	+3
GEN_Diesel_#2	Straße (LNF)	+3	0	0	-1	-2	-1	+1	k.A.	0	+2	+1	+3	+3	-4	+4	+2	-4	+2	+3	-4	+1	+3	0	0	+2	+2	-3	-1	+3
GEN_Diesel_#3	Schiff	+3	0	0	-1	-2	-1	+1	k.A.	0	+2	+1	+3	+3	-4	+4	+4	-3	+2	+3	0	+3	+4	0	0	+1	+2	0	-1	+3
GEN_DME_#1	Straße (LNF)	+3	0	0	+1	-1	0	+2	k.A.	+2	-1	-1	+1	-3	-3	+2	-2	-2	+3	+4	-2	+2	+4	0	+1	+3	-1	-2	-1	-2
GEN_Kerosin_#1	Luftfahrt (50%)	+3	0	0	-2	+1	+2	+2	k.A.	-2	+3	+1	+4	+4	0	+4	+3	-1	+3	+3	-1	+2	+3	0	+1	+1	+3	0	-1	+3
GEN_Kerosin_#2	Luftfahrt (100%)	+3	0	0	-2	-2	-1	+3	k.A.	-1	+2	+1	+1	+3	-4	+4	+3	-4	+2	+4	-4	+2	+4	0	0	0	+1	0	-2	+3
GEN_Hythan_#1	Straße (Pkw)	+3	+1	+1	+2	0	+1	+3	k.A.	+1	-2	-1	0	-1	-2	+2	-4	-2	+3	+4	-2	+2	+3	0	+2	+1	-1	-2	-3	-3
GEN_Methan_#1	Straße (Pkw)	+3	+1	+1	+1	0	+1	+3	k.A.	+1	-2	-1	+4	+1	-2	+2	-1	-1	+3	+4	-2	+2	+3	0	+1	+1	0	-2	-3	-1
GEN_LNG_#2	Straße (SNF)	+3	+1	+1	+1	0	0	+2	k.A.	+1	0	-1	+4	+1	-2	+2	+1	-2	+3	+4	-2	+2	+4	0	+1	+1	+1	-1	-2	0
GEN_LNG_#3	Schiff	+3	+1	+1	+1	0	0	+2	k.A.	+1	0	-1	+4	+1	-3	+3	+4	-2	+3	+4	+1	+3	+4	0	+1	+2	+1	+1	-1	+1
GEN_Methan_#4	Rückverstromung	+3	+1	+1	+1	0	+1	+3	k.A.	+1	-2	-1	+4	+4	-4	+4	+4	-4	+3	+4	-4	+1	+3	0	+1	+1	+1	k.A.	k.A.	k.A.
GEN_Methanol_#1	Straße (Pkw)	+4	+2	+2	+1	-1	0	+2	k.A.	+2	-1	0	-3	-1	-3	+2	-2	-1	+3	+4	-2	+2	+3	0	+1	+1	-1	-2	-3	-1
GEN_Methanol_#2	Straße (SNF)	+4	+2	+2	+1	-1	0	+2	k.A.	+2	-1	-1	-3	-3	-4	+1	-1	-3	+3	+4	-2	+2	+4	0	+1	+1	-2	-1	-2	-2

		Differenzkosten des Energiesystems	Strukturelle Veränderung des Energiesystems	Ausgenutzte Ressourcenpotenziale	Effizienz der Herstellung	Kosten im Jahr 2018	Kosten im Jahr 2030	Kosten im Jahr 2045	Flexibilisierungsoptionen	Umwelteigenschaften	Energieinhalt	Sicherheit, Handhabung (inkl. Haltbarkeit und Lagerfähigkeit)	Kompatibilität Normen / Regularien	Kompatibilität Technik	Kosten der Fahrzeughaltung	Tankvorgang	Tankinfrastruktur	THG-Emissionen 2018	THG-Emissionen 2030	THG-Emissionen 2045	Kumulierter Energieaufwand 2018	Kumulierter Energieaufwand 2030	Kumulierter Energieaufwand 2045	Ursprung des verwendeten CO <sub>2</sub>	Kosten / Nutzen	Umweltwirkungen	Anwendungstauglichkeit	Ökologisch-systemische Notwendigkeit von MEM	Nachfrageseitige Notwendigkeit von MEM	Angebotsseitige Notwendigkeit von MEM
Pfadname	Fokus-Verkehrsbereich	Integration ins Energiesystem			Techno-ökonomische Bewertung der Herstellung					Kraftstoffnutzung					Integration ins Verkehrssystem			Ökologische Bewertung							Akzeptanz			Markteinführung		
GEN_Methanol_#3	Schiff	+4	+2	+2	+1	-1	0	+2	k.A.	+2	-1	-1	+1	0	-3	+2	-1	-1	+3	+4	+1	+3	+4	0	+1	+2	0	+1	-1	0
MKS_B_CH4_#1	Straße (Pkw)	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	+3	k.A.	k.A.	k.A.	0	-2	-1	+4	+1	+3	+2	-1	+3	+4	+4	+4	+4	+4	k.A.	+3	+3	+1	k.A.	k.A.	k.A.
MKS_B_CH4_#2	Rückverstromung	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	+3	k.A.	k.A.	k.A.	0	-2	-1	+4	+4	+3	+4	+4	+4	+4	+4	+4	+4	+4	k.A.	+3	+3	+2	k.A.	k.A.	k.A.
MKS_B_HVO_#1	Straße (SNF)	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	0	+2	+1	+3	+3	+3	+4	+2	+3	+4	+4	+4	+4	+4	k.A.	k.A.	+3	+2	k.A.	k.A.	k.A.
MKS_G_CH4_#1	Straße (Pkw)	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	0	-2	-1	+4	+2	+4	+2	-1	+3	+3	+3	+1	+2	+2	k.A.	k.A.	+2	+1	k.A.	k.A.	k.A.
MKS_G_CH4_#2	Straße (SNF)	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	+4	k.A.	k.A.	k.A.	0	0	-1	+4	+2	+4	+1	+1	+2	+3	+3	+1	+2	+2	k.A.	+4	+2	+2	k.A.	k.A.	k.A.
MKS_G_CH4_#3	Schiff	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	+4	k.A.	k.A.	k.A.	0	0	-1	+4	+1	+4	+3	+4	+3	+3	+3	+3	+3	+3	k.A.	+4	+3	+2	k.A.	k.A.	k.A.
MKS_G_CH4_#4	Rückverstromung	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	0	-2	-1	+4	+4	+4	+4	+4	+3	+3	+3	+1	+1	+1	k.A.	k.A.	+2	+2	k.A.	k.A.	k.A.
MKS_Ö_Benzin_#1	Straße (Pkw)	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	+4	k.A.	k.A.	k.A.	-2	+2	0	+4	+4	+4	+4	+4	+2	+2	+3	+1	+2	+2	k.A.	+4	+1	+3	k.A.	k.A.	k.A.
MKS_Ö_Diesel_#1	Straße (SNF)	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	+4	k.A.	k.A.	k.A.	-2	+3	+1	+4	+4	+4	+4	+4	+2	+2	+3	+1	+2	+2	k.A.	+4	+1	+3	k.A.	k.A.	k.A.
MKS_Ö_Diesel_#2	Schiff	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	-3	+3	+1	+4	+4	+3	+4	+4	+2	+2	+3	+3	+3	+3	k.A.	k.A.	+2	+3	k.A.	k.A.	k.A.
MKS_Ö_Kerosin_#1	Luftfahrt (100%)	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	+4	k.A.	k.A.	k.A.	-3	+3	+1	+4	+4	+3	+4	+4	+2	+3	+3	+2	+2	+3	k.A.	+4	+2	+3	k.A.	k.A.	k.A.

## 4.1 Integration ins Energiesystem

### Herstellung von Benzin, Diesel und Kerosin über die Fischer-Tropsch-Route

Für die Bewertung der Herstellung von synthetischen Kraftstoffen wurde ein reduziertes REMix Modell (s. Kap. 6.8) mit nur einem Knoten in Deutschland erstellt. Dabei wird davon ausgegangen, dass die Kraftstoffe nur in Deutschland hergestellt werden und auch nur in Deutschland genutzt werden. Da die Herstellungsrouten separat bewertet werden sollen, wird davon ausgegangen, dass es in ganz Deutschland nur ein Herstellungsverfahren gibt. Somit werden hier Wechselwirkungen zwischen verschiedenen Verfahren ausgeschlossen.

Das hier beschriebene System wird sehr wahrscheinlich so nicht in Deutschland realisiert werden. Um die einzelnen Produktionsrouten separat bewerten zu können, müssen hier analytische Vereinfachungen vorgenommen werden, damit die Ergebnisse konkret einer Herstellungsrouten zugerechnet werden können. Das Rahmensystem ohne Kraftstoffherstellung wird aus den Analysen des Energiesystems (s. Kap.6.8) entnommen, so dass hier ein durchaus realistischer Rahmen genutzt wird.

Als Referenz wird zunächst ein System ohne Kraftstoffherstellung berechnet, um daraus die Differenzen zu einem System mit der Herstellung von Kraftstoffen zu berechnen.

Ergebnisse der Bewertungen finden sich in Tabelle 4-1. Wesentliche Unterschiede gibt es dabei nur zwischen den Fischer-Tropsch-, Methan- und Methanol-Routen. Dabei schneiden die Methan- und Methanol-Routen etwas besser ab, aber jeweils nur um eine Note. Bei den Fischer-Tropsch-Routen ist dabei jedoch zu beachten, dass die Bewertung auf jeweils einen Kraftstoff bezogen ist. Würde man die Bewertungen auf mehrere, kombinierte Kraftstoffe beziehen, würde sich die Bewertung wahrscheinlich etwas verbessern.

## 4.2 Techno-ökonomische Bewertung der Herstellung

In Tabelle 2-6 sind die Referenzpfade aufgelistet, welche der Begleitforschung dem Benchmarking mit dem "Stand-der-Technik" und als Referenz für die spezifischen Kraftstoffpfade der EiV-Verbundvorhaben dienen. Für die ganzheitliche Bewertung dieser Pfade ist eine techno-ökonomische Analyse der Kraftstoffherstellungsprozesse erforderlich. In Tabelle 4-2 ist aufgelistet, welche Prozesssimulation für die jeweilige Kraftstoffklasse erstellt und auf welche Literaturstellen sich dabei bezogen wurde.

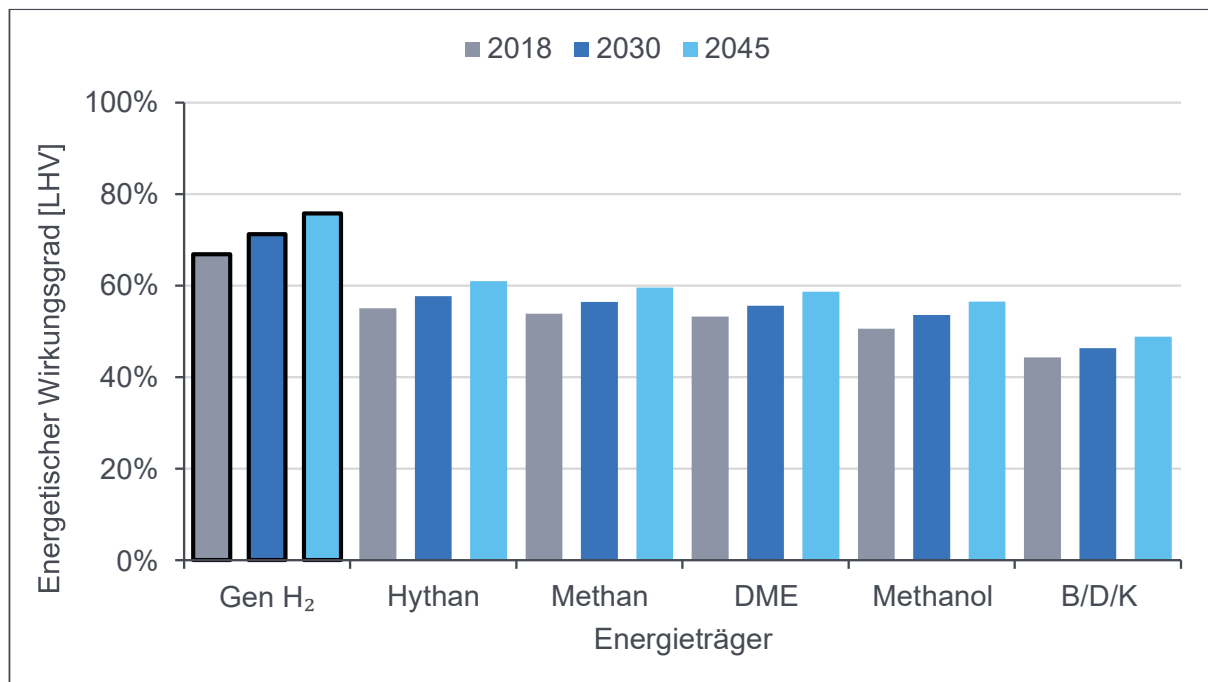
**Tabelle 4-2:** Basis für die TÖA der Herstellung der generischen Pfade

Kraftstoffklassen	Prozesssimulation	Quellen
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Benzin (Ottokraftstoff)</li> <li>• Dieselkraftstoff</li> <li>• Kerosin</li> </ul>	Fischer-Tropsch-Synthese	[Adelung et al. 2021]
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Methan</li> <li>• Hythan</li> </ul>	Methanisierung (Sabatier Prozess)	[Rönsch et al. 2016; Koschany et al. 2016]
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Methanol</li> </ul>	Methanolsynthese	[Van-Dal und Bouallou 2013; Bartholomew und Farrauto 2010]
<ul style="list-style-type: none"> <li>• DME</li> </ul>	Methanolsynthese + DME Synthese	[Michailos et al. 2019]

Demnach werden 4 Prozesssimulationen mit ASPEN Plus erstellt. Je eine für Methan, Methanol und DME sowie eine Simulation mit einer Fischer-Tropsch-Synthese für die Kraftstoffe Benzin, Diesel und Kerosin (B/D/K), da diese Stoffe Koppelprodukte dieser Synthese sind. Als weiterer Kraftstoff wird Hythan, eine Mischung aus 30 %<sub>Vol</sub> H<sub>2</sub> und 70 %<sub>Vol</sub> CH<sub>4</sub> betrachtet. Hier kann entweder Wasserstoff zu Methan hinzudosiert oder die Methanisierung mit erhöhtem Wasserstoff-Feed durchgeführt werden. Für alle Synthesen wird angenommen, wie bereits in Unterkapitel 2.2.5 beschrieben, dass generisches H<sub>2</sub> und CO<sub>2</sub> „aus der Leitung“ zur Verfügung gestellt werden. Die Prozesssimulationen von Methan, Methanol und der Fischer-Tropsch-Synthese wurden zusätzlich in Workshops den Verbänden präsentiert und gemeinsam abgestimmt. Ammoniak kam als generischer Pfad erst im Laufe des Projektes hinzu, aus diesem Grund wurde keine Prozesssimulation für die Ammoniaksynthese erstellt.

### **Bewertung der Effizienz generischer Kraftstoffe**

Für die Bewertung der Effizienz der jeweiligen Kraftstoffherstellungsprozesse wird auf Basis der Prozesssimulationen und der generischen Annahmen der jeweilige energetische Wirkungsgrad ermittelt. Die Ergebnisse sind in Abbildung 4-1 graphisch dargestellt.



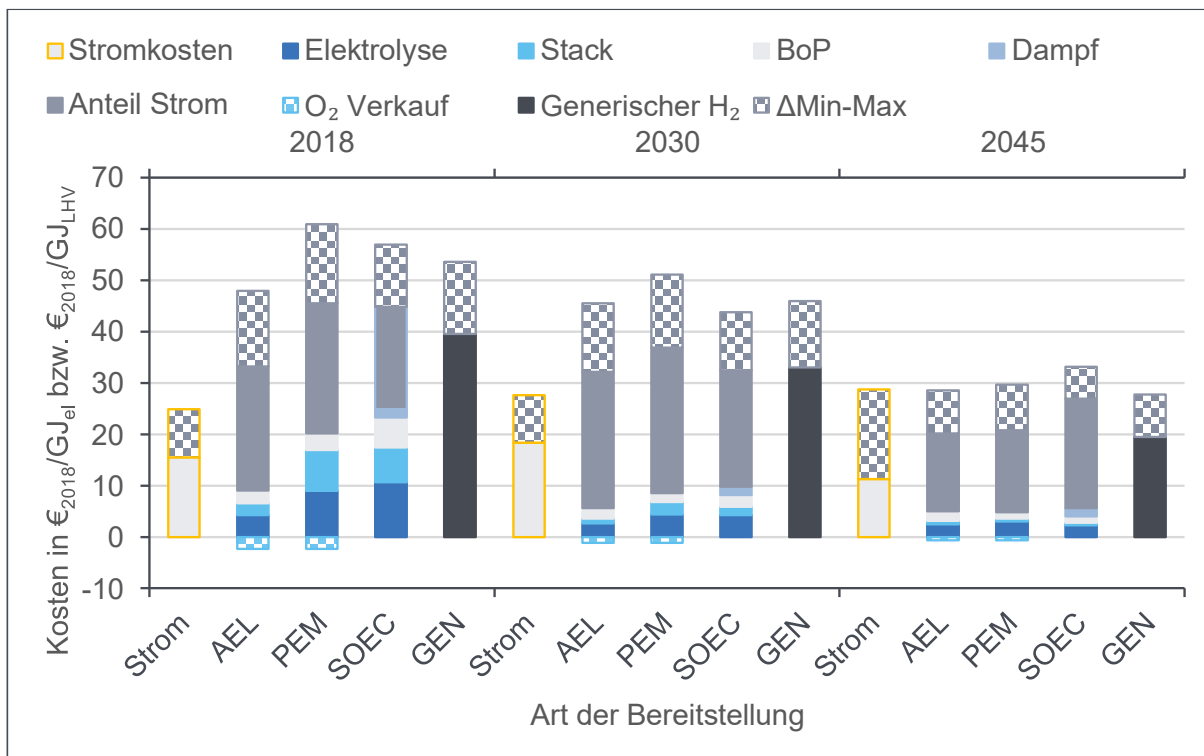
**Abbildung 4-1:** Energetischer Wirkungsgrad der generischen Kraftstoffherstellungsprozesse | B/D/K = Benzin, Diesel und Kerosin aus der Fischer-Tropsch-Synthese

Die Reihenfolge der Kraftstoffe ist dabei von links nach rechts mit sinkendem Wirkungsgrad gewählt. Dieser Trend lässt sich bis auf die Reihenfolge von Methanol-DME mit der steigenden Komplexität der Kraftstoffsynthesen erklären. Beispielsweise ist bei der Methanisierung das Hauptprodukt ein Gas und kann relativ leicht vom Nebenprodukt Wasser abgetrennt werden. Bei der Methanolsynthese ist mindestens eine Destillationskolonne erforderlich, da Methanol und Wasser als Flüssigkeitsgemisch nach der eigentlichen Synthese vorliegen. Ein Großteil des energetischen Verlustes erfolgt bereits bei der Umwandlung von elektrischer in chemische Energie bei der Bereitstellung des Wasserstoffs. Da die weiteren Synthese-Schritte allesamt exotherm sind, ergeben sich durch die Synthesen weitere Verluste.

### **Bewertung der Kosten generischer Kraftstoffe**

Zunächst wird auf die Kosten von Wasserstoff je nach Herstellungstechnologie und Stützjahr bei einer Laufzeit von 8.000 h/a eingegangen. Dafür sind in Tabelle 4-2 die Kosten für Wasserstoff je nach Elektrolysetechnologie aufgeschlüsselt. Zusätzlich sind die Stromkosten und die resultierenden generischen Kosten für Wasserstoff angegeben. Bei den Stromkosten und dem generischen Wert entspricht jeweils der untere Wert dem „minimal“ Fall, welcher bereits in Tabelle 2-2 und Tabelle 2-3 aufgelistet wurde. In den Säulen der einzelnen Technologien ist der Kostenanteil, welcher durch Steuern und Abgaben auf den bezogenen Strom entsteht, als schraffierte Fläche dargestellt. Um die Einheiten vergleichen zu können, sind die Stromkosten aus Tabelle 2-2 in €<sub>2018</sub>/GJ umgerechnet.

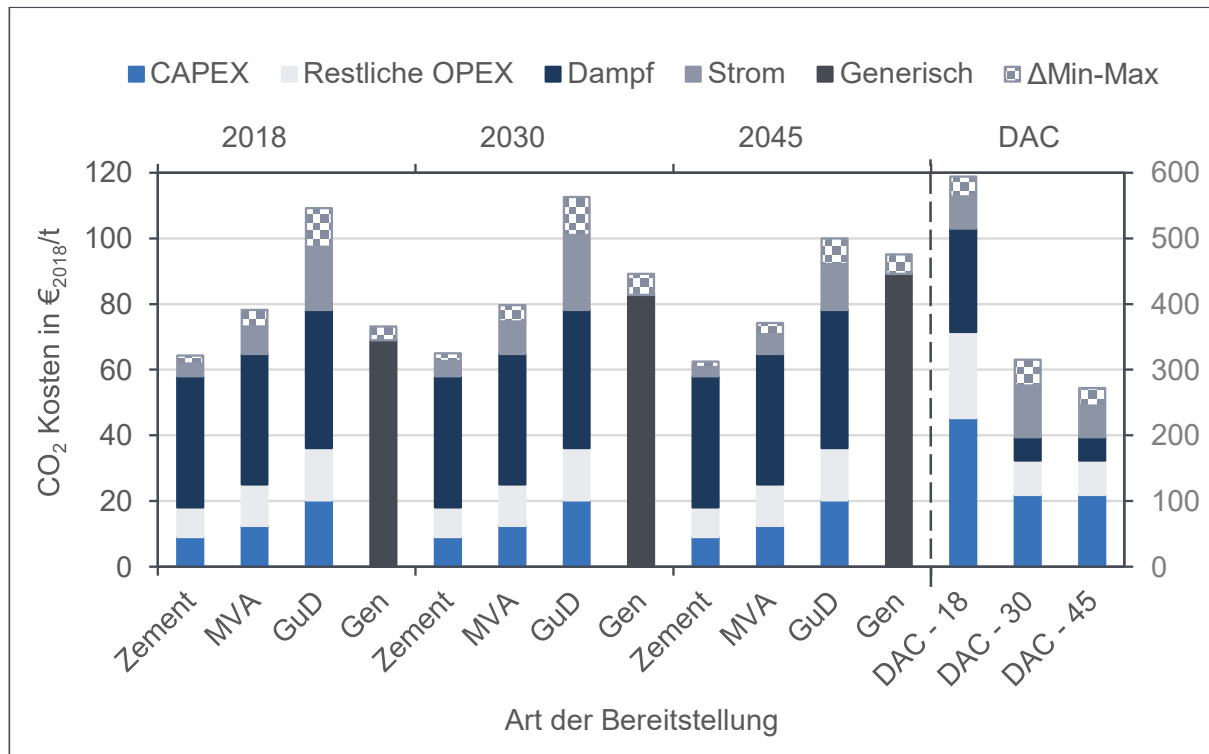




**Abbildung 4-2:** Kostenzusammensetzung von Wasserstoff je nach Elektrolysetechnologie und Stützjahr

Aus Abbildung 4-2 ist ersichtlich, welchen Einfluss die Stromkosten auf die Wasserstoffkosten haben und wie sich die spezifischen Kosten pro Energieeinheit erhöhen, wenn elektrische Energie in den chemischen Energieträger Wasserstoff umgewandelt wird. Im Referenzjahr 2018 werden die Kosten noch mehr als verdoppelt, was vor allem auf den Strombedarf des Elektrolyseprozesses und bei der PEM und der SOEC zu einem relevanteren Anteil auf die Investitionsausgaben der gesamten Elektrolyseeinheit inkl. Stack und BoP zurückzuführen ist. Perspektivisch sinkt der Anteil der Investitionsausgaben an den Gesamtkosten und macht im Jahr 2045 nur noch ca.  $5 \text{ €}_{2018}/\text{GJ}_{\text{LHV}}$  bzw.  $0.60 \text{ €}_{2018}/\text{kg}_{\text{H}_2}$  aus. Die minimalen Kosten für Wasserstoff, welche perspektivisch im Jahr 2045 in Deutschland erreicht werden, liegen somit bei ca.  $20 \text{ €}_{2018}/\text{GJ}_{\text{LHV}}$  bzw.  $2.40 \text{ €}_{2018}/\text{kg}_{\text{H}_2}$ .

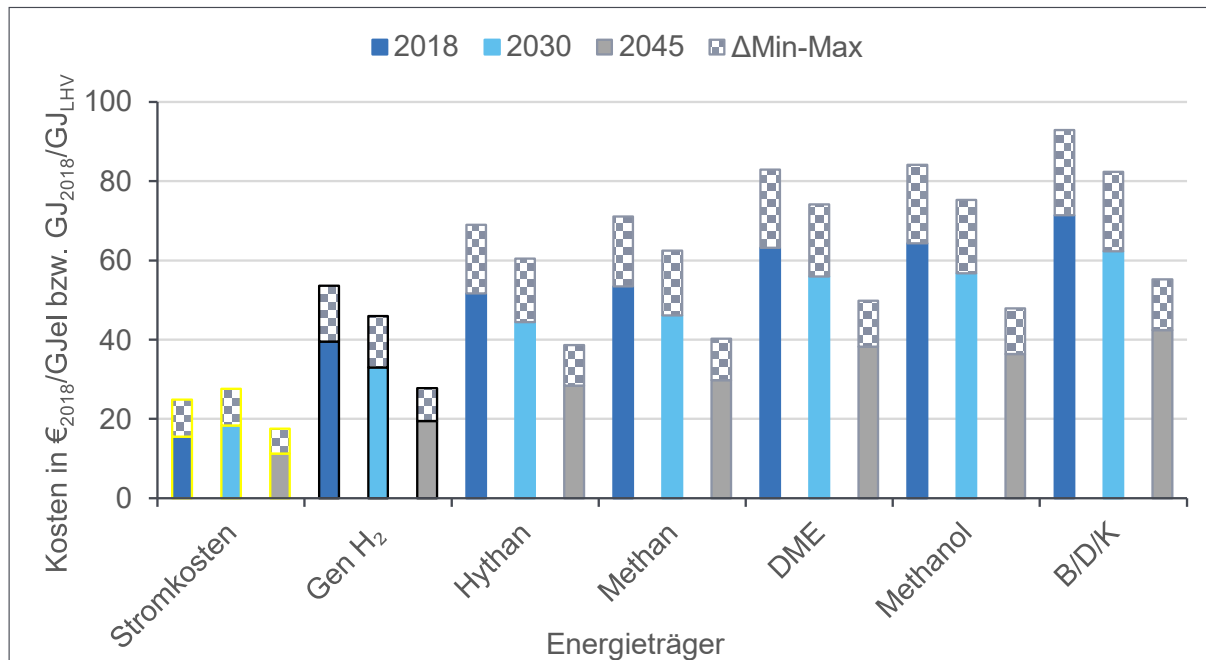
Im Weiteren wird auf die Kosten von CO<sub>2</sub> je nach Bereitstellungstechnologie und Stützjahr bei einer Laufzeit von 8.000 h/a eingegangen. Dafür sind in Abbildung 4-3 die Zusammensetzung der Kosten für CO<sub>2</sub> je nach Quelle aufgeschlüsselt. Zusätzlich sind die generischen Kosten für CO<sub>2</sub> angegeben, welche sich durch Tabelle 2-4 ergeben. Die Kosten für CO<sub>2</sub> aus der DAC sind aus Gründen der Übersichtlichkeit gebündelt auf der rechten Seite angegeben. Für diese gelten auch die Kosten der rechten Ordinate.



**Abbildung 4-3:** Kostenzusammensetzung von CO<sub>2</sub> je nach Bereitstellungsart und Stützjahr

Aus Abbildung 4-3 ist ersichtlich, dass die Kosten für CO<sub>2</sub> aus Punktquellen stark von den Kosten von Dampf abhängen. Dieser Kostenbestandteil kann reduziert werden, wenn die Kraftstoffherstellung mit der CO<sub>2</sub>-Wäsche verknüpft wird und dabei die Abwärme der Synthesen genutzt werden kann. Als Größenordnung kann ein spezifischer, thermischer Energiebedarf von 4 MJ/kg<sub>CO<sub>2</sub></sub> bei der MEA-Wäsche angegeben werden. Des Weiteren steigt der Einfluss der Stromkosten mit sinkendem Anteil an CO<sub>2</sub> im Abgas. Dieser Zusammenhang lässt sich mit dem spezifisch steigenden Bedarf an Kompressionsenergie erklären. Es muss mehr Gas komprimiert werden, um die gleiche Menge an CO<sub>2</sub> zu erhalten.

Auf Basis der Rahmenannahmen werden die Gestehungskosten der Referenzpfade für das Referenzjahr 2018 sowie perspektivisch für die Stützjahre 2030 und 2045 ermittelt. Die Ergebnisse sind in Abbildung 4-4 dargestellt. Auch hier ergibt sich die Spanne aus dem minimalen und maximalen Strompreis aus den Rahmenannahmen. Zusätzlich sind die Stromkosten und die Eingangskosten des generischen Wasserstoffes dargestellt.



**Abbildung 4-4:** Kraftstoffgestehungskosten der Referenzpfade | B/D/K = Benzin, Diesel und Kerosin via Fischer-Tropsch-Synthese

Die Gestehungskosten sind für die jeweiligen Kraftstoffe in von links nach rechts aufsteigender Reihenfolge dargestellt. Dabei sind die Kosten für Methan und Hythan in etwa gleich hoch, gleiches gilt für Methanol und DME. Die Gestehungskosten von DME sind minimal geringer als für Methanol, dies liegt jedoch an der energetischen Bilanzierung auf den Heizwert bei Standardbedingungen. Die Produkte aus der Fischer-Tropsch-Synthese haben die höchsten Gestehungskosten.

Auf Basis der Ergebnisse und den in Unterkapitel 3.2 vorgestellten Indikatoren und Einstufungen werden die Herstellungsprozesse für die generischen Pfade bewertet. Die Ergebnisse sind in Tabelle 4-3 aufgelistet.

Da bei keinem generischen Pfad Aspekte bzgl. der Flexibilisierungsoptionen untersucht wurden, gibt es keine Bewertungen der Indikatoren des Kriteriums 5 – Flexibilisierungsoptionen.

**Tabelle 4-3:** Indikatorbewertung der generischen Pfade aus Sicht der Kraftstoffherstellung

		GEN_Ammoniak_#1	GEN_Benzin_#1	GEN_Diesel_#1	GEN_Kerosin_#1	GEN_Hythan_#1	GEN_Methan_#1	GEN_Methan_#2 (LNG)	GEN_Methanol_#1	GEN_DME_#1
1) Effizienz der Herstellung	Wirkungsgrad - 2018	0	-3	-3	-3	0	-1	-1	-1	-1
	C-Ausbeute Gesamt	k.A.	+4	+4	+4	+4	+4	+4	+4	+4
	C-Ausbeute im Zielfuel	k.A.	-1	-2	-2	+4	+4	+4	+4	+4
2-4) Gestehungskosten	Gestehungskosten im Jahr 2018	-1	-2	-2	-2	+1	+1	0	-1	-1
	Gestehungskosten im Jahr 2030	0	-1	-1	-1	+1	+1	0	0	0
	Gestehungskosten im Jahr 2045	+2	+1	+1	+1	+3	+3	+2	+2	+2

### Ammoniak

Abweichend von der hier gezeigten Bewertung erfolgt die Betrachtung von Ammoniak. Die Effizienz der Herstellung ergibt sich hier nur aus dem energetischen Wirkungsgrad, welcher sich mit den Annahmen zur H<sub>2</sub>-Bereitstellung aus BEniVer (s. Kap. 2.2), einem N<sub>2</sub>-Input von 0,56 kWh/kg [Wernet et al. 2016] und einem Ammoniak-Output mit 5,25 kWh/kg zu 56 % ergibt. Dabei wird angenommen, dass pro Reaktordurchlauf im Haber-Bosch-Prozess 25 % der Eduktgase umgesetzt werden. Pro Tonne Ammoniak sind damit 0,18 t Wasserstoff und 0,84 t Stickstoff als Frischgaszufuhr notwendig, wobei zwecks Erhöhung der Ausbeute, Stickstoff stets im leichten Überschuss im Reaktionsgas vorliegt.

Die Bewertung für die Kosten der Herstellung in den Jahren 2018, 2030 und 2045 basiert auf Literaturdaten sowie einer Abschätzung auf Basis der BEniVer-Rahmenannahmen. Eine direkte Vergleichbarkeit zur Bewertung der anderen generischen Pfade ist daher nur bedingt gegeben. Die verwendeten Gestehungskosten sind in der Tabelle 4-4 aufgelistet. Die Werte aus der Literatur spiegeln die gefundene Bandbreite wieder. Für die Jahre 2018 und 2045 konnten der Literatur keine Daten entnommen werden, daher wurden hier Werte für 2020 bzw. 2050 herangezogen. Da keine Informationen zu Kosten existieren, denen ähnliche Annahmen wie in BEniVer zugrunde liegen, wurde zusätzlich für jedes Stützjahr eine Abschätzung der Gestehungskosten für Ammoniak unter Verwendung der Rahmenannahmen durchgeführt. Die Schätzwerte ergeben sich daher aus den minimalen Gestehungskosten für Wasserstoff (siehe Tabelle 2-3) sowie dem minimalen Endkundenpreis des Netzstromes (siehe Tabelle 2-2) für

die Synthese und die Stickstoffbereitstellung. Zudem wurde der Verkauf von Sauerstoff beachtet und übrige Kosten durch einen Faktor von 1,05 (Näherung basierend aus den Informationen der anderen Kraftstoffe) berücksichtigt.

Bei den Investitionskosten handelt es sich um eine Schätzung basierend auf den Informationen der IEA [IEA 2021a], welche aktuell für eine Anlagengröße von 2.400 t/d Kosten von 2,03 Mrd. € angibt. Die angenommenen Anlagengrößen für die anderen Kraftstoffe sind deutlich kleiner (250-570 t/d). Daher kann angenommen werden, dass in dieser Größenordnung die Investitionskosten für 2018 und 2030 in jedem Fall kleiner als 2 Mrd. € sind. Für 2050 wird angenommen, dass die Investitionskosten hier auf unter 1,5 Mrd. € sinken. Aufgrund der Wichtigkeit mit 0,2 haben die Investitionskosten keinen weiteren Einfluss auf die Gesamtbewertung, weswegen auf die Abschätzung konkreter Werte verzichtet wird.

**Tabelle 4-4:** Zusammenfassung Bewertung der Herstellung für Ammoniak

Jahr	Gestehungskosten (€/GJ)	Quelle	Bewertung Gestehungskosten		Schätzung FCI (Mrd. €)	Bewertung FCI	Gesamtbewertung
<b>2018 (2020)</b>	46,89	[IEA 2021b]	+1				
	117,77	[DEA 2018]	-4	-1,67	< 2,0	+1	-1
	72,54	Schätzung*	-2				
<b>2030</b>	20,84	[IEA 2021b]	+3				
	94,70	[DEA 2018]	-4	-0,67	< 2,0	+1	0
	61,48	Schätzung*	-1				
<b>2045 (2050)</b>	15,63	[IEA 2021b]	+4				
	60,90	[DEA 2018]	-1	+1,67	< 1,5	+2	+2
	36,69	Schätzung*	+2				

\*Die Abschätzung der Gestehungskosten erfolgt auf Basis der BEniVer-Rahmenannahmen.

### Weitere Analysen

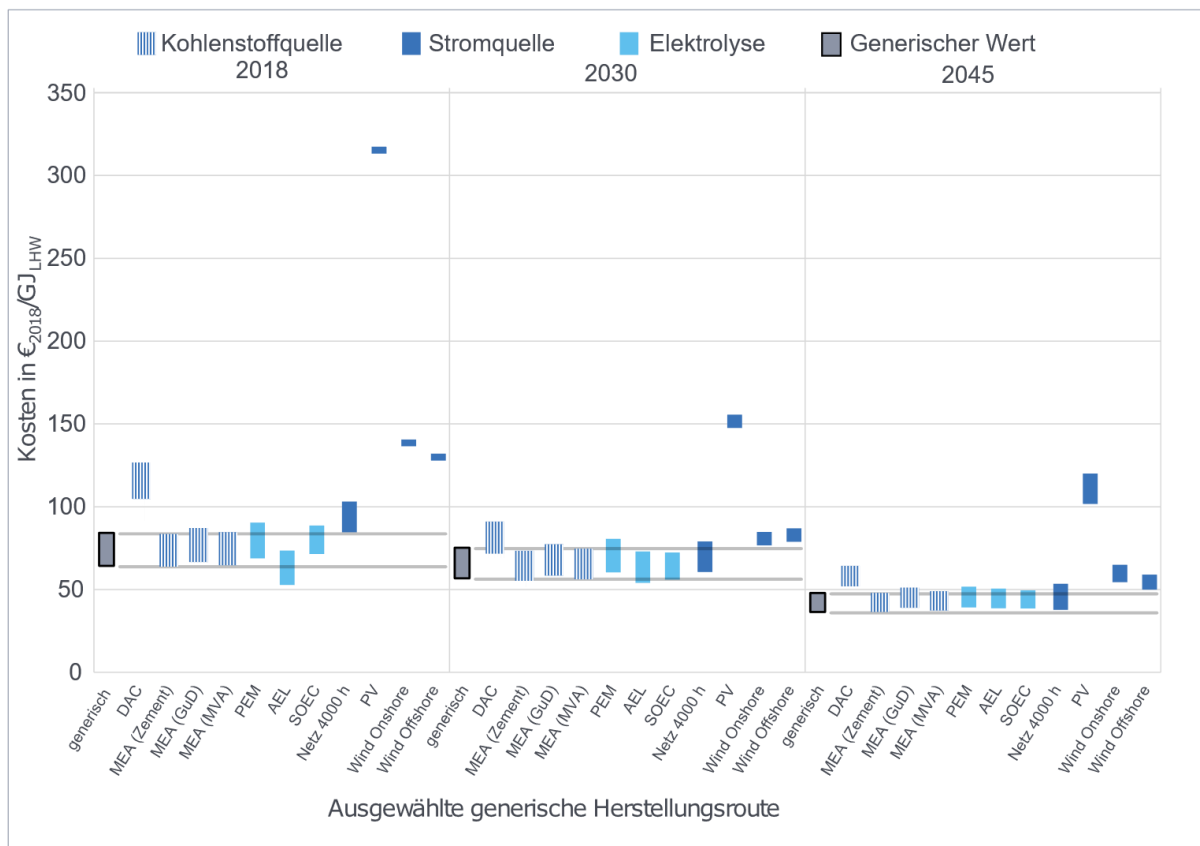
#### *Sensitivitätsanalysen*

Um den Einfluss einzelner Faktoren auf die Kosten abschätzen zu können, wurden verschiedene Grenzannahmen getroffen. Diese betreffen sowohl die Anlagengröße, es wurde zwischen „klein“ und „großskaligem“ Syntheseprozess unterschieden, als auch die Kosten und Zusammensetzung der verschiedenen, betrachteten Strom-, Wasserstoff- und CO<sub>2</sub>-Quellen. Als generische Kosten wurden die in Tabelle 2-2, Tabelle 2-3 und Tabelle 2-5 dargestellten Werte ermittelt. Darüber hinaus wurden Kosten und Vollbenutzungsstunden für Strom ermittelt: Netz 8.000 h, Netz 4.000 günstigste Stunden, PV, Wind Onshore, Wind Offshore. Die H<sub>2</sub>-Quelle wurde sowohl generisch als auch für die Elektrolysetechnologien PEM, AEL, SOEC untersucht und Produktionskosten ermittelt. Für die CO<sub>2</sub>-Gewinnung wurden DAC, MEA-Wä-

sche aus Zementkraftwerksabgasen, aus Gas- und Dampfkraftwerken und aus Müllverbrennungsanlagen betrachtet (Werte siehe Kapitel 2.2). Dies wurde jeweils für die Jahre 2018, 2030 und 2045 ermittelt.

Mit den unterschiedlichen Freiheitsgraden lassen sich NPC ermitteln, die als Grenzschatzungen zu verstehen sind, da beispielsweise unter den getroffenen Annahmen „Strom aus PV“ nur deutscher Sonnenstrom verwendet werden darf, jedoch kein Windstrom. Dies hätte zur Folge, dass die Anlage nur arbeiten darf, wenn Solarstrom zur Verfügung stünde, selbst wenn eine Stromtrasse direkt an der Produktionsstätte vorbeiführte. Andererseits lassen sich so Aussagen zu Einflüssen der einzelnen Technologien auf die sich ergebenden NPC abschätzen.

Um dies zu veranschaulichen wurde beispielhaft die NPC der „großskaligen“ Methanol-Synthese für die Jahre 2018, 2030 und 2045 mit den Grenzschatzungen in Abbildung 4-5 dargestellt. Hierfür wurde grundsätzlich mit generischen Annahmen gerechnet, bis auf die dargestellten Parameter. Als Referenz wurde der gesamte generische Wert angegeben.



**Abbildung 4-5:** Kraftstoffgestehungskosten generisches Methanol mit Variation der C-, H- und Stromquelle

Allgemein fällt auf, dass unter den getroffenen Annahmen 2018 deutlich höhere Kostenspreizungen errechnet wurden als in den darauffolgenden Jahren. Gründe dafür, können sowohl

für die Strombereitstellung, v.a. die angenommene Zusammensetzung des generischen Stromes, darstellen, als auch allgemein für alle Technologien der angenommene technische Fortschritt. Auffällig sind die hohen Kosten bei Verwendung von erneuerbarem Strom, insbesondere für PV, welche jedoch mit Fortschreiten der Technik als sinkend abgeschätzt werden. Die Gewinnung von CO<sub>2</sub> über DAC stellt ebenfalls einen Kostennachteil für die Technologien dar, solange andere Punktquellen verfügbar sind. Für die Wasserstoffherstellung wird 2018 die AEL als kostengünstigste Technologie dargestellt.

Es sei darauf hingewiesen, dass das dargestellte Ergebnis Tendenzen aufzeigen soll, die im Rahmen der Annahmen gelten. Je weiter die Abschätzungen in der Zukunft liegen, umso unschärfer sind die Ergebnisse einzuordnen.

## 4.3 Kraftstoffnutzung

### Bereich Pkw

Im Pkw-Bereich werden hinsichtlich der Nutzung drei unterschiedliche Kraftstoffe betrachtet: Benzin, Methanol und CNG (Compressed Natural Gas), wobei im Fall von Benzin und CNG neben dem synthetischen Kraftstoffpfad auch die fossile Variante bewertet wird. Die Ergebnisse der Bewertung für die entsprechenden generischen, fossilen und biogenen Kraftstoffpfade sind in Tabelle 4-5 zusammengefasst.

Beim generischen **synthetischen Benzin** handelt es sich um ein Produkt des Fischer-Tropsch- (FT-)Prozesses. Die Bewertung des synthetischen Benzins unterscheidet sich vom fossilen Benzin v.a. durch die Umwelteigenschaften, welche hier leicht verbessert sind. Ein synthetischer Kraftstoff kann effizienter verbrannt werden, was insgesamt zu einer Verringerung der Schadstoffemissionen führt. Dies betrifft insbesondere alle Schadstoffe, die aus einer unvollständigen Verbrennung resultieren, d.h. die Emissionen von Kohlenmonoxid (CO), Rußpartikeln und unverbrannten Kohlenwasserstoffen (HC-Emissionen). Des Weiteren enthalten fossile Kraftstoffe stets auch restliche Schwefelverbindungen. Diese sind im fossilen Benzin zwar von untergeordneter Bedeutung, dennoch ist nur ein rein synthetischer Kraftstoff komplett schwefelfrei. Da das FT-Rohprodukt überwiegend lineare oder nur leicht verzweigte Kohlenwasserstoffe enthält, sind zusätzliche Raffinerieprozesse notwendig, damit das FT-Benzin die in der Norm EN 228 geforderten Eigenschaften, wie z.B. die Oktanzahl, erfüllt und die Kompatibilität zu bestehenden Ottomotoren gegeben ist. Bei der Bewertung mit +3 im Bereich der Kompatibilität wurde berücksichtigt, dass auch bei Normerfüllung der Eigenschaften das FT-Benzin hinsichtlich seiner Zusammensetzung nicht identisch mit der fossilen Referenz ist.

Bei der Nutzung von **Methanol** können aufgrund des hohen H:C-Verhältnisses sowie des Sauerstoffs im Molekül alle Emissionen, die mit einer unvollständigen Verbrennung einhergehen, deutlich reduziert werden. Da es sich um einen rein synthetischen Kraftstoff handelt, spielen auch Schwefel- bzw. SO<sub>x</sub>-Emissionen keine Rolle. Bezüglich der NO<sub>x</sub>-Emissionen ist aufgrund der höheren Verbrennungstemperaturen von Methanol zunächst ein leichter Anstieg an NO<sub>x</sub>-Emissionen zu erwarten. Jedoch wird der Brennraum durch die höhere Verdampfungsenthalpie abgekühlt, was bei geeigneter Motorsteuerung zu geringeren NO<sub>x</sub>-Emissionen führt. Da mittels eines Katalysators restliches NO<sub>x</sub> sehr gut aus dem Abgas entfernt werden kann, gibt

es hier ein hohes Potenzial die  $\text{NO}_x$ -Emissionen insgesamt zu verringern. Aufgrund des vorhandenen Sauerstoffes im Brennstoffmolekül kann es bei (un)günstigen Reaktionsbedingungen außerdem zur Bildung neuer Schadstoffe aus der Klasse der Aldehyde und Ketone kommen. Die Energiedichte von Methanol ist mit 15,7 MJ/l bzw. 19,9 MJ/kg nur etwa halb so groß wie die von klassischen Kraftstoffen (z.B. Benzin: 30,8 MJ/l bzw. 41 MJ/kg), was sich nachteilig auf die Reichweite auswirkt. Aufgrund der hohen Oktanzahl (ROZ = 109) und der physikalisch ähnlichen Eigenschaften von Methanol und Benzin ist eine Anwendung im Ottomotor durchaus möglich, auch wenn es hierfür noch keine Norm gibt und zu erwarten ist, dass zumindest beim Einsatz einzelner Materialien Änderungen vorgenommen werden müssen. Beachtet werden muss allerdings die Hygroskopizität des Methanols, da gelöstes Wasser die Energiedichte zusätzlich verringert und zu Korrosion führen kann. Eine komplette Umrüstung auf einen direkt auf Methanol angepassten Motor ist hingegen wirtschaftlich nicht sinnvoll.

Für **CNG** werden insgesamt vier verschiedene Einsatzformen unterschieden: fossiles CNG, synthetisches CNG aus regenerativen Energiequellen (= generischer Pfad), CNG aus Biomethan sowie CNG in einer Mischung mit 30 %<sub>vol</sub> Wasserstoff, was auch als Hythan oder HCNG bezeichnet wird. Hinsichtlich der Umwelteigenschaften ordnet sich CNG zwischen synthetischem Benzin und Methanol ein, da aufgrund des zusätzlichen Wasserstoffes weniger C-haltige Emissionen verursacht werden. Im Vergleich zur fossilen Referenz ist der Verbrauch des synthetischen CNG besser bewertet, da durch den Wegfall der Schwefelbestandteile die Abgasnachbehandlung entfällt, was sich positiv auf den Verbrauch auswirkt und zu weniger  $\text{CO}_2$ -Emissionen führt. Bei den H:C-Emissionen zeigen Untersuchungen eine starke Abhängigkeit vom Motor, Motoreinstellungen und verwendeten Katalysatoren. Die Anwendung von Erdgas bzw. Methan birgt auch immer das Risiko, dass das Gas beim Handling oder durch Leckagen auch direkt in die Umwelt gelangt (Methanschlupf, siehe dazu auch die Erklärung der Indikatoren im Kapitel 3.3). Da es sich um einen gasförmigen Kraftstoff handelt, ist der Energiegehalt geringer als bei flüssigen Kraftstoffen, was zu einer geringeren Reichweite führt, und bei der Handhabung müssen v.a. Maßnahmen bzgl. des Explosionsschutzes beachtet werden. Da Erdgas je nach Herkunft einen Methangehalt von 75 % bis 99 % aufweist, sind die Eigenschaften von synthetischem Methan nicht mit denen von Erdgas gleichzusetzen, was sich v.a. in der Methanzahl und dem Wobbe-Index ausdrückt. Während sich der Wobbe-Index aus dem Heizwert ergibt, spiegelt die Methanzahl (MZ) analog der Oktanzahl für Ottokraftstoffe die Klopfestigkeit des Brenngases wieder. Per Definition gilt für reines Methan  $\text{MZ} = 100$  und erfüllt somit die Norm EN 16723, die eine Methanzahl von min. 65 vorgibt. Jedoch können sich dadurch die Zündeigenschaften nachteilig ändern, was insbesondere bei der Anwendung im Straßenverkehr berücksichtigt werden muss. Insgesamt wird aber erwartet, dass ein Umstieg von Erdgas auf synthetisches Methan relativ einfach möglich ist. Erdgasfahrzeuge gehören zwar zum Stand der Technik, nehmen aber nur einen geringen Anteil in der Anwendung ein. Hinsichtlich der Verringerung von Schadstoffemissionen ist die stärkere Nutzung von Erdgas als Kraftstoff allerdings eine mögliche Option, weswegen u.a. auch eine Umrüstung von mit flüssigen Kraftstoffen betriebenen Fahrzeugen auf Erdgas berücksichtigt wird. Die Umrüstung eines Pkws mit Ottomotor auf CNG-Betrieb ist mit Kosten von 4.500 € verbunden, was zwar kostenintensiv, aber wirtschaftlich noch vertretbar ist, da diese deutlich unterhalb eines Neufahrzeuges liegen. Bei der Bewertung der Verordnungen wurde berücksichtigt, dass es für die Anwendung von synthetischem CNG noch ausstehende europäische Rechtsakte gibt [DE-CHEMA 2023].



**Tabelle 4-5:** Bewertung der Referenzpfade für die Kraftstoffnutzung im Bereich Straße (Pkw)

Kraftstoffpfad		Syn_Benzin_Pkw	Syn_Hythan_Pkw	Syn_CNG_Pkw	Syn_Methanol_Pkw	Bio_CNG_Pkw	Fossil_CNG_Pkw	Fossil_Benzin_Pkw
		100 % FT-Benzin	30 %Vol Wasserstoff + 70 %Vol Methan	100 % Methan	100 % Methanol	100 % Biogas	100 % Erdgas	100 % fossiles Benzin
Kraftstoff		100 % FT-Benzin	30 %Vol Wasserstoff + 70 %Vol Methan	100 % Methan	100 % Methanol	100 % Biogas	100 % Erdgas	100 % fossiles Benzin
1) Umwelt- eigenschaften	CO	-3	+3	+2	+3	+2	+2	-3
	NO <sub>x</sub>	-2	-3	-2	+1	-2	-2	-2
	Ruß / Partikel (Anzahl, Masse)	-1	+3	+2	+3	+2	+2	-2
	unverbrannte KW (HC-Emission)	-1	+3	0	+3	0	0	-2
	Schwefelverbindungen	+4	+4	+4	+4	-1	-3	-1
	CO <sub>2</sub> und H <sub>2</sub> O (Verbrauch)	+2	+2	+1	-1	0	0	+2
	weitere Schadstoffe	0	-2	-4	-3	-4	-4	0
	<b>gesamt</b>	<b>-1</b>	<b>+1</b>	<b>+1</b>	<b>+2</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>-1</b>
2) Energie- inhalt	Energiedichte volumetrisch	+2	-3	-3	-2	-3	-3	+2
	Energiedichte gravimetrisch	+2	+4	+4	-2	+4	+4	+2
	Dichte (Stoffdichte)	+1	-4	-3	+1	-3	-3	+1
	<b>gesamt</b>	<b>+2</b>	<b>-2</b>	<b>-2</b>	<b>-1</b>	<b>-2</b>	<b>-2</b>	<b>+2</b>
3) Sicherheit und Handhabung (inkl. Haltbarkeit und Lagerfähigkeit)	Siedepunkt / Siedebereich	0	-2	-2	+2	-2	-2	0
	Dampfdruck	-2	n.a.	n.a.	-1	n.a.	n.a.	-2
	Gefrierpunkt	+4	n.a.	n.a.	+4	n.a.	n.a.	+4
	Zündtemperatur	+2	+4	+4	+4	+4	+4	+2
	Zündgrenzen	0	-3	-1	-2	-1	-1	0
	Oktanzahl / Cetanzahl / Methanzahl (oben) + Wobbeindex (unten)	0	0	0	+4	0	0	0
		0	-2	0		0	0	
	Flammpunkt	-4	n.a.	n.a.	-3	n.a.	n.a.	-4
	Hygroskopizität	0	n.a.	n.a.	-3	n.a.	n.a.	0
	(Oxidations-) Stabilität	+2	+2	+2	-1	+2	+2	+2
	Diffusivität	n.a.	-2	0	n.a.	0	0	n.a.
Oberflächenspannung	0	n.a.	n.a.	0	n.a.	n.a.	0	

Kraftstoffpfad		Syn_Benzin_Pkw	Syn_Hythan_Pkw	Syn_CNG_Pkw	Syn_Methanol_Pkw	Bio_CNG_Pkw	Fossil_CNG_Pkw	Fossil_Benzin_Pkw
Kraftstoff		100 % FT-Benzin	30 %Vol Wasserstoff + 70 %Vol Methan	100 % Methan	100 % Methanol	100 % Biogas	100 % Erdgas	100 % fossiles Benzin
	Dynamische Viskosität	0	n.a.	n.a.	0	n.a.	n.a.	0
	Kinematische Viskosität	0	n.a.	n.a.	0	n.a.	n.a.	0
	Gefahrenpotenzial bei unsachgemäßer Anwendung	-3	-4	-4	-3	-4	-4	-3
	<b>gesamt</b>	<b>0</b>	<b>-1</b>	<b>-1</b>	<b>0</b>	<b>-1</b>	<b>-1</b>	<b>0</b>
4) Normen / Regularien	REACH	+4	0	+4	+4	+4	+4	+4
	Normen	+3	0	+4	-4	+4	+4	+4
	Verordnungen	+4	-1	+2	-2	+2	+4	+4
	<b>gesamt</b>	<b>+3</b>	<b>0</b>	<b>+4</b>	<b>-3</b>	<b>+4</b>	<b>+4</b>	<b>+4</b>
5) Technik	Umrüstung	+4	-4	-2	-4	-2	-2	+4
	Materialverträglichkeit	+3	0	+4	0	+4	+4	+4
	Drop-In-fähig	+3	+1	+3	-1	+3	+4	+4
	Anwendung bekannt / Erfahrung	+3	+2	+3	+3	+3	+4	+4
	<b>gesamt</b>	<b>+3</b>	<b>-1</b>	<b>+1</b>	<b>-1</b>	<b>+1</b>	<b>+2</b>	<b>+4</b>

Bei der Anwendung von **Hythan** kann die geringere Dichte des Wasserstoffes durch dessen höheren Heizwert sowie einem höheren Druck bei der Komprimierung kompensiert werden, weswegen die Reichweite vergleichbar mit CNG-Fahrzeugen ist. Hinsichtlich der Eigenschaften und Handhabung sind die Diffusivität und die Korrosivität (H<sub>2</sub>-Versprödung) des Wasserstoffes zu beachten, was v.a. den Einsatz angepasster Materialien erfordert. Aufgrund des Wasserstoffanteils verursacht Hythan nochmals weniger C-haltige Emissionen als CNG, auch die mit dem Methanschlupf verbundenen Emissionen sind etwas geringer. Für die Umrüstung auf einen HCNG-Antrieb wurden die Kosten allerdings auf 25.000 € bestimmt – aus wirtschaftlicher Sicht ist eine Umrüstung hier damit nicht sinnvoll. Auch aus rechtlicher Sicht ist eine Anwendung von CNG mit Wasserstoffbeimischung gegenwärtig kritisch: es gibt keine eigene Norm und laut EN 16723 sind nur max. 2 %<sub>Vol</sub> H<sub>2</sub> im Erdgas erlaubt.

### **Bereich leichte Nutzfahrzeuge (LNF)**

Für die Anwendung in leichten Nutzfahrzeugen werden DME als Vertreter der Ether und FT-Diesel betrachtet. Die Zusammenfassung der Bewertung ist in Tabelle 4-6 (zusammen mit der Bewertung für die schweren Nutzfahrzeuge) gezeigt. Die Umwelteigenschaften von **DME** sind vergleichbar mit denen von Methanol (siehe *Bereich Pkw*), d.h. bei der Verbrennung entstehen weniger Ruß-, CO- und HC-Emissionen und gebildetes NO<sub>x</sub> kann besser aus dem Abgas entfernt werden. Ebenfalls besteht das Potenzial zur Bildung von Aldehyden und Ketonen im Abgas. Die Energiedichte von DME ist mit 18,44 MJ/l bzw. 27,6 MJ/kg etwas größer als bei Methanol, aber geringer als bei Diesel (36 MJ/l bzw. 43 MJ/kg). Wegen der notwendigen Druckverflüssigung (der Siedepunkt liegt bei etwa -25 °C, bei Raumtemperatur ist DME gasförmig) sowie der anzunehmenden Materialinkompatibilität, ist eine direkte Anwendung im Dieselmotor daher nicht ohne größeren Aufwand möglich. Die Kosten für eine Umrüstung werden mit etwa 4.900 € angenommen. Für die Anwendung von DME als Dieseleratz spricht allerdings neben dem hohen Potenzial zur Minderung von Rußemissionen auch dessen hohe Cetanzahl, welche mit 55 oberhalb der Mindestanforderung für einen Dieselmotor liegt [Schemme et al. 2017]. Aus rechtlicher Sicht wäre zumindest auch eine Vornorm für den Einsatz von DME bereits vorhanden. Die Bewertung des **FT-Diesels** erfolgt analog zur Anwendung in schweren Nutzfahrzeugen und ist dort näher erläutert.

### **Bereich schwere Nutzfahrzeuge (SNF)**

Für den Schwerlastverkehr wird die Anwendung von verschiedenen Dieselmotorkraftstoffen, Methanol und LNG (Liquified Natural Gas) bewertet (siehe Tabelle 4-6). Neben dem generischen **FT-Diesel** und dem fossilen Diesel wird auch das **HVO** (Hydrogenated Vegetable Oil) als zusätzlicher Referenzpfad betrachtet. Hinsichtlich der Zusammensetzung und Eigenschaften unterscheiden sich FT-Diesel und HVO kaum voneinander, da es sich jeweils um einen reinen paraffinischen Dieselmotorkraftstoff handelt, der die Norm EN 15940 erfüllt und daher in modernen Dieselfahrzeugen, die dafür durch die Hersteller freigegeben sind, eingesetzt werden kann. Auch wenn grundsätzlich eigentlich keine Kompatibilitätsprobleme zu erwarten sind, liegt der paraffinische Diesel aufgrund seiner etwas geringeren Dichte allerdings außerhalb der Norm EN 590 und ist daher nicht universell für alle Dieselmotoren freigegeben. Die geringere Dichte rührt vom Fehlen der Aromaten her, was dadurch auch zu einer etwas geringeren volumetrischen Energiedichte führt. Andererseits ist das H:C-Verhältnis etwas größer als im fossilen Diesel. Dadurch ist die gravimetrische Energiedichte leicht höher und auch die Verbrennung läuft effizienter, d.h. vollständiger, ab, was zusätzlich die Schadstoffemissionen verringert. Analog zum synthetischen Benzin werden daher direkt die CO-, Ruß- und HC-Emissionen reduziert. Durch die geringeren Ruß-Emissionen kann der Katalysator auch Stickoxide (NO<sub>x</sub>) effektiver aus dem Abgas entfernen. In der Sicherheit und Handhabung gibt es zwischen den synthetischen Dieselmotorkraftstoffen und dem fossilen Diesel keine Unterschiede. Für die Anwendung vor allem relevant ist hier der Gefrierpunkt bzw. die Kälteeigenschaften des synthetischen Dieselmotorkraftstoffes. Durch die Abwesenheit cyclischer Komponenten ist es je nach Region unter Umständen eher notwendig die Zusammensetzung und den Siedeschnitt anzupassen, um ein Ausflocken von Kraftstoffbestandteilen im Winter vorzubeugen.

Für **Methanol** gelten hinsichtlich der Umwelteigenschaften und Energiegehalt die gleichen Aussagen wie im Pkw-Bereich. Was die direkte Nutzung im Schwerlastverkehr als Ersatz für Dieselmotorkraftstoff betrifft, ist v.a. die hohe Oktanzahl hier ein Nachteil, da dies gleichbedeutend

mit einer niedrigen Cetanzahl ist, die die Zündwilligkeit des Kraftstoffes angibt. Bei Einsatz eines Kraftstoffes mit schlechtem Selbstzündverhalten in einem Dieselmotor, werden höhere Temperaturen und / oder Druck zum Zünden benötigt. Dadurch ist die Verbrennung ineffektiv, es kommt zu einem höheren Verbrauch sowie ggf. auch zu höheren Emissionen und es kann sich im ungünstigsten Fall schädlich auf den Motor auswirken. Im Gegensatz zur Anwendung im Ottomotor wird Methanol für eine Anwendung im Dieselmotor und damit auch im Lkw-Bereich daher als ungeeignet eingeschätzt. Auch eine Umrüstung ist hier wirtschaftlich nicht sinnvoll.

Für den Schwerlasttransport wird Erdgas in verflüssigter Form als **LNG** eingesetzt, da dadurch die Energiedichte im Vergleich zum komprimierten Erdgas (CNG) deutlich erhöht werden kann. Die gravimetrische Energiedichte ist mit etwa 50 MJ/kg sogar höher als von flüssigen Kraftstoffen (zwischen 40 MJ/kg und 45 MJ/kg). Für dessen Speicherung sind allerdings gut isolierte Tanks erforderlich, die einen größeren Raumbedarf als konventionelle Tanks erfordern, da Temperaturen von bis zu -162 °C (für reines Methan, bei Erdgas sogar bis -195 °C) notwendig sind, um es bei atmosphärischem Druck in der flüssigen Phase zu halten. Auch ist die volumetrische Energiedichte mit 22,5 MJ/l geringer (vgl. Diesel ca. 36 MJ/l), was sich negativ auf die Reichweite auswirkt. Die Umwelteigenschaften sind unabhängig von der Anwendungsform und daher ähnlich dem CNG. Ferner handelt es sich auch beim synthetischem LNG um reines Methan, was sich somit vom fossilem LNG unterscheidet (siehe dazu auch CNG im Abschnitt *Bereich Pkw*). Für eine Anwendung in LNG-Motoren müssen daher ggf. geänderte Zündeigenschaften berücksichtigt werden, was aber als unproblematisch eingeschätzt wird. Analog zu den CNG-Fahrzeugen im Pkw-Bereich gehören LNG-Lkw zwar zum Stand der Technik, nehmen aber nur einen geringen Anteil in der Anwendung ein. Hinsichtlich der Verringerung von Schadstoffemissionen ist die stärkere Nutzung von (momentan noch) Erdgas auch im Schwerlastverkehr eine mögliche Option. Die Umrüstung eines Lkws mit Dieselmotor auf einen LNG-Antrieb ist mit Kosten in Höhe von etwa 32.000 € verbunden. Eine kostenintensive Investition, welche im Vergleich zur Neuanschaffung wirtschaftlich aber als noch vertretbar eingestuft wird.

**Tabelle 4-6:** Bewertung der Referenzpfade für die Kraftstoffnutzung im Bereich Straße (leichte und schwere Nutzfahrzeuge)

Kraftstoffpfad		Syn_Diesel_L/SNF*	Syn_DME_LNF	Syn_LNG_SNF	Syn_Methanol_SNF	Bio_HVO_SNF	Fossil_LNG_SNF	Fossil_Diesel_SNF
Kraftstoff		100 % FT-Diesel	100 % DME	100 % Methan	100 % Methanol	100 % HVO	100 % Erdgas	100 % fossiler Diesel
1) Umwelt-eigenschaften	CO	-3	+2	+2	+3	-3	+2	-4
	NO <sub>x</sub>	-1	+1	-2	+1	-1	-2	-3
	Ruß / Partikel (Anzahl, Masse)	-1	+3	+2	+3	-1	+2	-3
	unverbrannte KW (HC-Emission)	-1	+3	0	+3	-1	0	-3
	Schwefelverbindungen	+4	+4	+4	+4	+4	-3	-1
	CO <sub>2</sub> und H <sub>2</sub> O (Verbrauch)	+3	0	+1	-1	+3	0	+3
	weitere Schadstoffe	0	-3	-4	-3	0	-4	0
	<b>gesamt</b>	<b>0</b>	<b>+2</b>	<b>+1</b>	<b>+2</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>-2</b>
2) Energie-inhalt	Energiedichte volumetrisch	+2	-1	0	-2	+2	0	+3
	Energiedichte gravimetrisch	+3	-1	+4	-2	+3	+4	+3
	Dichte (Stoffdichte)	+2	-1	-3	+1	+2	-3	+2
	<b>gesamt</b>	<b>+2</b>	<b>-1</b>	<b>0</b>	<b>-1</b>	<b>+2</b>	<b>0</b>	<b>+3</b>
3) Sicherheit und Handhabung (inkl. Haltbarkeit und Lagerfähigkeit)	Siedepunkt / Siedebereich	+1	-1	-4	+2	+1	-4	+1
	Dampfdruck	+1	-3	n.a.	-1	+1	n.a.	+1
	Gefrierpunkt	+1	+4	n.a.	+4	+1	n.a.	+1
	Zündtemperatur	+2	+2	+4	+4	+2	+4	+2
	Zündgrenzen	+2	-2	-1	-2	+2	-1	+2
	Oktanzahl / Cetanzahl / Methanzahl (oben) + Wobbeindex (unten)	0	+1	0	-4	0	0	0
	Flammpunkt	+2	-4	n.a.	-3	+2	n.a.	+2
	Hygroskopizität	0	0	n.a.	-3	0	n.a.	0
	(Oxidations-) Stabilität	+2	-1	+2	-1	+2	+2	+2
	Diffusivität	n.a.	n.a.	0	n.a.	n.a.	0	n.a.
	Oberflächenspannung	0	0	n.a.	0	0	n.a.	0

Kraftstoffpfad		Syn_Diesel_L/SNF*	Syn_DME_LNF	Syn_LNG_SNF	Syn_Methanol_SNF	Bio_HVO_SNF	Fossil_LNG_SNF	Fossil_Diesel_SNF
		100 % FT-Diesel	100 % DME	100 % Methan	100 % Methanol	100 % HVO	100 % Erdgas	100 % fossiler Diesel
	Dynamische Viskosität	0	0	n.a.	0	0	n.a.	0
	Kinematische Viskosität	0	0	n.a.	0	0	n.a.	0
	Gefahrenpotenzial bei unsachgemäßer Anwendung	-1	-4	-4	-3	-1	-4	-1
	<b>gesamt</b>	<b>+1</b>	<b>-1</b>	<b>-1</b>	<b>-1</b>	<b>+1</b>	<b>-1</b>	<b>+1</b>
4) Normen / Regularien	REACH	+4	+4	+4	+4	+4	+4	+4
	Normen	+4	+2	+4	-4	+4	+4	+4
	Verordnungen	-2	-2	+2	-2	-2	+4	+4
	<b>gesamt</b>	<b>+3</b>	<b>+1</b>	<b>+4</b>	<b>-3</b>	<b>+3</b>	<b>+4</b>	<b>+4</b>
5) Technik	Umrüstung	+4	-2	-2	-4	+4	-2	+4
	Materialverträglichkeit	+3	-2	+4	0	+3	+4	+4
	Drop-In-fähig	+3	-4	+3	-3	+3	+4	+4
	Anwendung bekannt / Erfahrung	+3	-3	+3	-2	+3	+4	+4
	<b>gesamt</b>	<b>+3</b>	<b>-3</b>	<b>+1</b>	<b>-3</b>	<b>+3</b>	<b>+2</b>	<b>+4</b>

\*für LNF und SNF

### Bereich Schifffahrt

Wie in Tabelle 4-7 gezeigt, werden für die Schifffahrt die Kraftstoffe Diesel, Methanol und LNG betrachtet. Hinzu kommt die Anwendung von Ammoniak. Während hier der gleiche **FT-Diesel** wie für die Anwendung im Straßenverkehr betrachtet wird, dient als fossile Referenz der Schiffsdiesel (MGO = Marine Gas Oil). Bei der Betrachtung von synthetischem Diesel als alternativen Kraftstoff für die Schifffahrt, muss beachtet werden, dass MGO für gewöhnlich eine höhere Dichte als Lkw-Diesel aufweist und im Durchschnitt eine höhere C-Atomanzahl enthält. Paraffinischer Diesel, der der Norm EN 15940 entspricht, erfüllt zwar auch die Norm für niedrigviskosen Schiffsdiesel [ISO 8217], ist aber daher evtl. nicht uneingeschränkt bzw. beliebig in MGO-Motoren einsetzbar. Durch Anpassungen an der Motorsteuerung, lässt sich ein evtl. Effizienz- oder Reichweitenverlust ggf. ausgleichen. Mit größeren Kompatibilitätsproblemen

wird in diesem Bereich daher nicht gerechnet. Auch wenn hier nicht näher bewertet, gilt ähnliches auch für die Anwendung in Motoren, die für den Einsatz von Schweröl (Heavy Fuel Oil / HFO) ausgelegt sind und in der Schifffahrt die Mehrheit der Antriebssysteme ausmachen.

**Tabelle 4-7:** Bewertung der Referenzpfade für die Kraftstoffnutzung im Bereich Schifffahrt

Kraftstoffpfad		Syn_Ammoniak_Schiff	Syn_Diesel_Schiff	Syn_LNG_Schiff	Syn_Methanol_Schiff	Fossil_LNG_Schiff	Fossil_Diesel_Schiff
		100 % Ammoniak	100 % FT-Diesel	100 % Methan	100 % Methanol	100 % Erdgas	100 % fossiler Schiffsdiesel
1) Umwelt-eigenschaften	CO	+4	-3	+2	+3	+2	-4
	NO <sub>x</sub>	-3	-1	+1	+1	+1	-4
	Ruß / Partikel (Anzahl, Masse)	+4	-1	+2	+3	+2	-4
	unverbrannte KW (HC-Emission)	+4	-1	0	+3	0	-4
	Schwefelverbindungen	+4	+4	+4	+4	-3	-3
	CO <sub>2</sub> und H <sub>2</sub> O (Verbrauch)	+2	+3	+1	-1	0	+3
	weitere Schadstoffe	-4	0	-4	-3	-4	0
	<b>gesamt</b>	<b>+2</b>	<b>0</b>	<b>+1</b>	<b>+2</b>	<b>0</b>	<b>-2</b>
2) Energie-inhalt	Energiedichte volumetrisch	-2	+2	0	-2	0	+3
	Energiedichte gravimetrisch	-2	+3	+4	-2	+4	+4
	Dichte (Stoffdichte)	-1	+2	-3	+1	-3	+3
	<b>gesamt</b>	<b>-2</b>	<b>+2</b>	<b>0</b>	<b>-1</b>	<b>0</b>	<b>+3</b>
3) Sicherheit und Handhabung (inkl. Haltbarkeit und Lagerfähigkeit)	Siedepunkt / Siedebereich	-1	+1	-4	+2	-4	+1
	Dampfdruck	n.a.	+1	n.a.	-1	n.a.	+1
	Gefrierpunkt	n.a.	+1	n.a.	+4	n.a.	+1
	Zündtemperatur	+4	+2	+4	+4	+4	+2
	Zündgrenzen	-2	+2	-1	-2	-1	+2
	Oktanzahl / Cetanzahl / Methanzahl (oben) + Wobbeindex (unten)	-4	0	0	-4	0	-1
	Flammpunkt	n.a.	+2	n.a.	-3	n.a.	+2

Kraftstoffpfad		Syn_Ammoniak_Schiff	Syn_Diesel_Schiff	Syn_LNG_Schiff	Syn_Methanol_Schiff	Fossil_LNG_Schiff	Fossil_Diesel_Schiff
		100 % Ammoniak	100 % FT-Diesel	100 % Methan	100 % Methanol	100 % Erdgas	100 % fossiler Schiffsdiesel
	Hygroskopizität	n.a.	0	n.a.	-3	n.a.	0
	(Oxidations-) Stabilität	+4	+2	+2	-1	+2	+2
	Diffusivität	0	n.a.	0	n.a.	0	n.a.
	Oberflächenspannung	n.a.	0	n.a.	0	n.a.	0
	Dynamische Viskosität	n.a.	0	n.a.	0	n.a.	0
	Kinematische Viskosität	n.a.	0	n.a.	0	n.a.	0
	Gefahrenpotenzial bei unsachgemäßer Anwendung	-4	-1	-4	-3	-4	-1
	<b>gesamt</b>	<b>-1</b>	<b>+1</b>	<b>-1</b>	<b>-1</b>	<b>-1</b>	<b>+1</b>
4) Normen / Regularien	REACH	+4	+4	+4	+4	+4	+4
	Normen	-4	+4	+4	+1	+4	+4
	Verordnungen	-4	0	+2	0	+4	+4
	<b>gesamt</b>	<b>-3</b>	<b>+3</b>	<b>+4</b>	<b>+1</b>	<b>+4</b>	<b>+4</b>
5) Technik	Umrüstung	-4	+3	-3	-3	-3	+4
	Materialverträglichkeit	-3	+4	+4	0	+4	+4
	Drop-In-fähig	-4	+3	+4	+2	+4	+4
	Anwendung bekannt / Erfahrung	-1	+3	+4	+3	+4	+4
	<b>gesamt</b>	<b>-3</b>	<b>+3</b>	<b>+1</b>	<b>0</b>	<b>+1</b>	<b>+4</b>

Als Standardkraftstoff wird in der Schifffahrt bereits auch **LNG** verwendet. Die Eigenschaften von LNG bzw. Methan allgemein sind bereits im *Bereich Schwere Nutzfahrzeuge (SNF)* bzw. *Bereich Pkw* erläutert. Mit der besseren Bewertung bei den NO<sub>x</sub>-Emissionen wird für die Anwendung von LNG in der Schifffahrt berücksichtigt, dass die im Tier III festgelegten Grenzwerte der IMO (International Maritime Organization) ohne Abgasnachbehandlung eingehalten werden können. Je nach Schiffsart und -größe können die Kosten für eine Umrüstung in der Größenordnung des Anschaffungspreises liegen. Neben den Kosten für einen Gasmotor und



isolierte Tanks kommt hinzu, dass ein Frachtschiff während der Umrüstung keinen finanziellen Ertrag bringt. Aus wirtschaftlicher Sicht ist eine Umrüstung daher nur sinnvoll, wenn der Umbau gefördert oder subventioniert wird. Die Anwendung von LNG in einer Brennstoffzelle wird ebenfalls untersucht [E4tech und Houlder 2021] und würde auch hier eine größere Flexibilität bieten.

**Methanol** als Kraftstoff wurde bereits für den Pkw- und Lkw-Bereich betrachtet. Ähnlich zur Anwendung im Schwerlasttransport ist aufgrund der Eigenschaften des Methanols auch hier ein direkter Einsatz in einem klassischen Schiffsmotor unrealistisch. Allerdings ist die Verwendung von Methanol im maritimen Bereich bereits bekannt, d.h. es gibt Schiffsmotoren, die für Methanol ausgelegt sind. Einzelne Schiffe wurden bereits umgerüstet und (Fracht-)Schiffe sind auf dem Markt bereits erhältlich [Tagesschau 2021]. Der (finanzielle) Aufwand für die Umrüstung ist ähnlich wie beim LNG. Während allerdings das Problem mit dem Tank leichter zu lösen ist (unter Umständen reicht eine gründliche Reinigung des Dieseltanks aus), muss der Motor mit einer anderen Einspritzung versehen werden und ist daher etwas komplexer. Neben der Anwendung von Methanol in einem Verbrennungsmotor, besteht auch die Möglichkeit der Verwendung in einem mit einer Brennstoffzelle angetriebenem Schiff. Auch diese Anwendung ist mit TRL 6-7 [E4tech und Houlder 2021] bereits grundsätzlich bekannt und bietet die Möglichkeit, Methanol flexibler einzusetzen. Rechtlich gesehen benötigen mit Methanol betriebene Schiffe bislang noch eine Einzelzulassung, da es noch keine allgemeingültigen Regularien zu Anwendung von Methanol als Kraftstoff in der Schifffahrt gibt.

Der Vorteil von **Ammoniak** zeigt sich v.a. bei den Umwelteigenschaften, da sämtliche C-haltigen Emissionen bei der Verbrennung wegfallen. Es kommt allerdings zur Bildung größerer Mengen an  $\text{NO}_x$  und auch Lachgas ( $\text{N}_2\text{O}$ ). Ein um das 273-fache stärkeres Treibhausgas als  $\text{CO}_2$ , kann entstehen. Grundlegend sind verschiedene Möglichkeiten der Abgasnachbehandlung aus anderen Anwendungsfeldern und von den gängigen Kraftstoffen bekannt. Dazu zählen innermotorische Maßnahmen wie auch die thermische und katalytische Abgasnachbehandlung. Inwieweit sich diese Systeme allerdings auch direkt auf die Verbrennung von Ammoniak in Schiffsmotoren übertragen lassen, ist bislang noch Gegenstand der Forschung, weswegen hier bei der Bewertung von Rohemissionen ausgegangen wird. Die Bewertung der  $\text{NO}_x$ -Emissionen mit -3 im Vergleich zu -4 für den Schiffsdiesel soll dabei anzeigen, dass diese bei Ammoniak theoretisch leichter aus dem Abgas entfernbar sind, da das Abgas des Schiffsdiesels auch von anderen Emissionen (Ruß, CO, HC und  $\text{SO}_x$ ) gereinigt werden muss. Der Indikator „ $\text{CO}_2$  und  $\text{H}_2\text{O}$  (Verbrauch)“ bezieht sich bei den kohlenstoffbasierten Kraftstoffen auf die durch den Verbrauch verursachten  $\text{CO}_2$ -Emissionen. Im Fall von Ammoniak entsteht zwar kein  $\text{CO}_2$ , allerdings berücksichtigt die Bewertung auch den hohen Verbrauch an Ammoniak. Da der Heizwert von verflüssigtem Ammoniak mit 18,6 MJ/kg nicht einmal halb so groß wie die des Schiffsdiesels (etwa 45 MJ/kg) ist, wird mehr als die doppelte Menge benötigt. Von seinen physikalischen Eigenschaften her, ist Ammoniak mit einem Siedepunkt von  $-33,4\text{ °C}$  leichter handhabbar als LNG. Durch den Transport für die Chemieindustrie ist auch bekannt, wie Ammoniak zu lagern ist. Nichtsdestotrotz stellt dessen Toxizität ein höheres Sicherheitsrisiko dar. Die Anwendung als Kraftstoff ist auch aus regulatorischer Sicht nicht möglich, da bislang weder Vorschriften noch Zulassungen zur Nutzung als Kraftstoff existieren. Durch seine schlechten Verbrennungseigenschaften und Korrosivität gegenüber vielen Werkstoffen, ist eine Kompatibilität mit Bestandsschiffen ebenfalls nicht gegeben.

Wie bereits in Kapitel 3.3 beschrieben, müssten auch mögliche Emissionen von Ammoniak durch Leckagen und Schlupf in Erwägung gezogen werden. Da Ammoniak ein wichtiges Vorläufergas von atmosphärischen Aerosolpartikeln darstellt, könnten derartige Emissionen zu einer Erhöhung der Partikelzahl sowie der Konzentration verschiedener Partikelkomponenten (z.B. Ammonium, Nitrat) führen. Dies hätte zum einen eine kühlende Wirkung auf das Klima [Bellouin et al. 2011]. Zum anderen könnte dies aufgrund der Toxizität der Partikel jedoch zu einer verstärkten Beeinträchtigung der Luftqualität führen. Die Effekte von über Land freigesetzten Ammoniakemissionen (z.B. aus der Landwirtschaft) wurden zwar bereits in zahlreichen Studien untersucht, die Wirkungen möglicher Ammoniakemissionen aus dem Schiffsverkehr auf Klima und Luftqualität waren bisher jedoch noch nicht Gegenstand gezielter Forschung.

### Bereich Luftfahrt

Der Tabelle 4-8 ist die Bewertung für synthetisches Kerosin (auch SAF für Sustainable Aviation Fuel genannt) im Vergleich mit der fossilen Referenz zu entnehmen. Für die Anwendung des SAF werden zwei Anwendungsfälle unterschieden: als **Blend zu 50 %<sub>Vol</sub>** mit Jet A-1 sowie als **100%iges SAF**. Ähnlich wie bei der Betrachtung des FT-Diesels, liegt auch beim Kerosin der Hauptunterschied zwischen dem fossilen und dem synthetischen Treibstoff im Vorhandensein bzw. der Abwesenheit von Aromaten, was die Schadstoffbildung und die Eigenschaften beeinflusst. Durch die Beimischung von SAF zu fossilem Jet A-1 werden die Umwelteigenschaften v.a. durch die Minderung der Rußemissionen verbessert. Bei Kerosin ist grundsätzlich zu bedenken, dass die Emissionen direkt in die oberen Atmosphärenschichten eingetragen werden. Mit der Verwendung von reinem SAF können die Schadstoffemissionen des Luftverkehrs weiter verringert werden. Im Gegensatz zu den Kraftstoffen im bodengebundenen Verkehr, welche je nach Region in ihrer Zusammensetzung variieren können, gilt weltweit der gleiche Standard für Kerosin. Daher wird der Flammpunkt hier kritischer betrachtet und muss v.a. in sehr warmen Regionen beachtet werden. Analog zum Diesel gilt auch hier, dass der rein paraffinische Treibstoff zwar eine etwas geringere volumetrische Energiedichte aufweist, dieses durch das höhere H:C-Verhältnis aber ausgeglichen wird und sogar eine Verringerung des Verbrauchs möglich ist. Die Zertifizierung des 50 %-Blends nach ASTM D7566 stellt sicher, dass der Treibstoff vollständig kompatibel mit allen bestehenden Flugzeugen bzw. Triebwerken ist. Der Einsatz eines reinen SAF ist hingegen noch nicht zugelassen. Auch wenn es bereits mehrere erfolgreiche Testflüge gab, wird angenommen, dass für den Dauerbetrieb der Einsatz angepasster Materialien für Dichtungen und Ventile notwendig ist, welche im Rahmen von routinemäßigen Wartungsarbeiten getauscht werden können.

**Tabelle 4-8:** Bewertung der Referenzpfade für die Kraftstoffnutzung im Bereich Luftfahrt

Kraftstoffpfad		Syn_SAF50_Luft	Syn_SAF100_Luft	Fossil_Kerosin_Luft
		50 % <sub>vol</sub> SAF + 50 % <sub>vol</sub> fossiles Kerosin	100 % SAF	100 % fossiles Kerosin
1) Umwelt- eigenschaften	CO	-3	-3	-3
	NO <sub>x</sub>	-3	-3	-3
	Ruß / Partikel (Anzahl, Masse)	-2	-1	-2
	unverbrannte KW (HC-Emission)	-2	-2	-2
	Schwefelverbindungen	-1	+4	-1
	CO <sub>2</sub> und H <sub>2</sub> O (Verbrauch)	+3	+3	+3
	weitere Schadstoffe	0	0	0
	<b>gesamt</b>	<b>-2</b>	<b>-1</b>	<b>-2</b>
2) Energie- inhalt	Energiedichte volumetrisch	+3	+2	+3
	Energiedichte gravimetrisch	+3	+3	+3
	Dichte (Stoffdichte)	+2	+2	+2
	<b>gesamt</b>	<b>+3</b>	<b>+3</b>	<b>+3</b>
3) Sicherheit und Handhabung (inkl. Haltbarkeit und Lagerfähigkeit)	Siedepunkt / Siedebereich	+1	+1	+1
	Dampfdruck	+1	+1	+1
	Gefrierpunkt	+3	+3	+3
	Zündtemperatur	+2	+2	+2
	Zündgrenzen	+2	+2	+2
	Oktanzahl / Cetanzahl / Methanzahl (oben) + Wobbeindex (unten)	0	0	0
	Flammpunkt	0	0	0
	Hygroskopizität	+1	+1	+1
	(Oxidations-) Stabilität	+3	+3	+3
	Diffusivität	n.a.	n.a.	n.a.
	Oberflächenspannung	0	0	0

Kraftstoffpfad		Syn_SAF50_Luft	Syn_SAF100_Luft	Fossil_Kerosin_Luft
		50 % <sub>Vol</sub> SAF + 50 % <sub>Vol</sub> fossiles Kerosin	100 % SAF	100 % fossiles Kerosin
	Dynamische Viskosität	0	0	0
	Kinematische Viskosität	0	0	0
	Gefahrenpotenzial bei unsachgemä- ßer Anwendung	-1	-1	-1
	<b>gesamt</b>	<b>+1</b>	<b>+1</b>	<b>+1</b>
4) Normen / Regularien	REACH	+4	+4	+4
	Normen	+4	-1	+4
	Verordnungen	+4	+4	+4
	<b>gesamt</b>	<b>+4</b>	<b>+1</b>	<b>+4</b>
5) Technik	Umrüstung	+4	+3	+4
	Materialverträglichkeit	+4	+3	+4
	Drop-In-fähig	+4	+3	+4
	Anwendung bekannt / Erfahrung	+4	+2	+4
	<b>gesamt</b>	<b>+4</b>	<b>+3</b>	<b>+4</b>

### Bereich Rückverstromung

Für die Verbrennung in Gasturbinen wird bislang komprimiertes Erdgas (CNG) genutzt. Entsprechend werden auch hier synthetisches, strombasiertes **CNG** sowie Biomethan als alternative Anwendungen betrachtet (siehe Tabelle 4-9). Die Bewertung ist weitestgehend identisch mit der Anwendung im Straßenverkehr, v.a. hinsichtlich der Umwelteigenschaften, des Energieinhaltes sowie für die Sicherheit und Handhabung. Hier sind lediglich die HC-Emissionen etwas besser bewertet, im Vergleich zur Anwendung im Straßenverkehr, da von einem stationären Prozess ausgegangen wird, der weniger abhängig von Motoreinstellungen und Katalysatoren ist. Aufgrund der höheren Brennstoffflexibilität von modernen Gasturbinen wird angenommen, dass die Umstellung von Erdgas auf synthetisches Methan technisch uneingeschränkt möglich ist. Hinsichtlich der Kompatibilität zu Normen und Regularien wird in der Be-

wertung berücksichtigt, dass es für die Anwendung von synthetischem CNG noch ausstehende europäische Rechtsakte gibt, ansonsten kann synthetisches CNG wie Erdgas behandelt werden.

**Tabelle 4-9:** Bewertung der Referenzpfade für die Anwendung im Bereich Rückverstromung

Kraftstoffpfad		Syn_CNG_Strom	Bio_CNG_Strom	Fossil_CNG_Strom
		100 % Methan	100 % Biogas	100 % Erdgas
1) Umwelt-eigenschaften	CO	+2	+2	+2
	NO <sub>x</sub>	-2	-2	-2
	Ruß / Partikel (Anzahl, Masse)	+2	+2	+2
	unverbrannte KW (HC-Emission)	+2	+2	+2
	Schwefelverbindungen	+4	-1	-3
	CO <sub>2</sub> und H <sub>2</sub> O (Verbrauch)	+1	0	0
	weitere Schadstoffe	-4	-4	-4
	<b>gesamt</b>	<b>+1</b>	<b>0</b>	<b>0</b>
2) Energie-inhalt	Energiedichte volumetrisch	-3	-3	-3
	Energiedichte gravimetrisch	+4	+4	+4
	Dichte (Stoffdichte)	-3	-3	-3
	<b>gesamt</b>	<b>-2</b>	<b>-2</b>	<b>-2</b>
3) Sicherheit und Handhabung (inkl. Haltbarkeit und Lagerfähigkeit)	Siedepunkt / Siedebereich	-2	-2	-2
	Dampfdruck	n.a.	n.a.	n.a.
	Gefrierpunkt	n.a.	n.a.	n.a.
	Zündtemperatur	+4	+4	+4
	Zündgrenzen	-1	-1	-1
	Oktanzahl / Cetanzahl / Methanzahl (oben) + Wobbeindex (unten)	0	0	0
		0	0	0
	Flammpunkt	n.a.	n.a.	n.a.
	Hygroskopizität	n.a.	n.a.	n.a.
(Oxidations-) Stabilität	+2	+2	+2	

Kraftstoffpfad		Syn_CNG_Strom	Bio_CNG_Strom	Fossil_CNG_Strom
		100 % Methan	100 % Biogas	100 % Erdgas
	Diffusivität	0	0	0
	Oberflächenspannung	n.a.	n.a.	n.a.
	Dynamische Viskosität	n.a.	n.a.	n.a.
	Kinematische Viskosität	n.a.	n.a.	n.a.
	Gefahrenpotenzial bei unsachgemäßer Anwendung	-4	-4	-4
	<b>gesamt</b>	<b>-1</b>	<b>-1</b>	<b>-1</b>
4) Normen / Regularien	REACH	+4	+4	+4
	Normen	+4	+4	+4
	Verordnungen	+2	+2	+4
	<b>gesamt</b>	<b>+4</b>	<b>+4</b>	<b>+4</b>
5) Technik	Umrüstung	+4	+4	+4
	Materialverträglichkeit	+4	+4	+4
	Drop-In-fähig	+4	+4	+4
	Anwendung bekannt / Erfahrung	+4	+4	+4
	<b>gesamt</b>	<b>+4</b>	<b>+4</b>	<b>+4</b>

## 4.4 Integration ins Verkehrssystem: Straße

### Bereich Pkw

Die Bewertung der generischen, synthetischen, biogenen und fossilen Kraftstoffe im Pkw-Bereich ist in Tabelle 4-10 dargestellt.

**Tabelle 4-10:** Bewertungsübersicht generische Pfade, Integration ins Verkehrssystem: Bereich Pkw (Kosten exkl. MWSt und EnergieSt)

Kraftstoffpfad		MKS_Ö_Benzin_#1	MKS_G_CH4_#1	MKS_B_CH4_#1	GEN_Benzin_#1	GEN_Methan_#1	GEN_Hythan_#1	GEN_Methanol_#1
Kraftstoff		Benzin	Methan	Methan	Benzin	Methan (CNG)	HCNG	Methanol
<b>Kosten der Fahrzeughaltung</b>	Anschaffungskosten	+4	+1	+1	+4	+1	-1	+4
	Kraftstoffkosten	+3	+4	+3	-4	-2	-2	-3
	Fahrzeug- und Kraftstoffkosten	+4	+4	+3	-4	-2	-2	-3
	<b>gesamt</b>	<b>+4</b>	<b>+4</b>	<b>+3</b>	<b>-4</b>	<b>-2</b>	<b>-2</b>	<b>-3</b>
<b>Tankvorgang</b>	Betankungszeit	+4	+3	+3	+4	+3	+3	+4
	Reichweite pro Tankvorgang	+4	+1	+1	+4	+1	0	0
	<b>gesamt</b>	<b>+4</b>	<b>+2</b>	<b>+2</b>	<b>+4</b>	<b>+2</b>	<b>+2</b>	<b>+2</b>
<b>Tankinfrastruktur</b>	Tankstellenverfügbarkeit	+4	0	0	+4	0	-4	-4
	Investitionsaufwand für ausreichende Tankstellenabdeckung	+4	-2	-2	+4	-2	-4	0
	<b>gesamt</b>	<b>+4</b>	<b>-1</b>	<b>-1</b>	<b>+4</b>	<b>-1</b>	<b>-4</b>	<b>-2</b>
<b>Kosten der Fahrzeughaltung (2018)</b>	Anschaffungskosten	18.991 €	20.604 €	20.604 €	18.991 €	20.604 €	21.291 €	19.207 €
	Kraftstoffkosten in €/100km	4,10	2,70	3,90	17,50	13,50	13,60	15,40
	Fahrzeug- und Kraftstoffkosten	26.533 €	25.599 €	27.894 €	51.368 €	45.575 €	46.502 €	47.732 €
<b>Tankvorgang</b>	Betankungszeit (Min./100km)	0,2	1,6	1,6	0,2	1,6	1,5	0,4
	Reichweite pro Tankvorgang	698 km	452 km	465 km	713 km	465 km	380 km	381 km
<b>Tankinfrastruktur</b>	Tankstellenverfügbarkeit	100 %	6 %	6 %	100 %	6 %	0 %	0 %
	Investitionsaufwand für ausreichende Tankstellenabdeckung	0 Mio. €	2.788 Mio. €	2.788 Mio. €	0 Mio. €	2.788 Mio. €	7.046 Mio. €	393 Mio. €

Unter den betrachteten strombasierten Kraftstoffen resultiert synthetisches Benzin als die attraktivste Option für die Anwendung in Pkws. Durch die Drop-In-Fähigkeit entstehen keine Mehrkosten bei der Fahrzeuganschaffung, bzw. ist keine Umrüstung des Fahrzeugs notwendig. Die bestehende Tankstelleninfrastruktur kann weiterhin verwendet werden und Reichweite und Betankungszeit sind identisch im Vergleich zur Nutzung von fossilem Benzin. Lediglich die Kraftstoffkosten sind mit 17,5 Euro /100km (exklusive Energie- und Mehrwertsteuer) aufgrund der deutlich höheren Herstellungskosten nachteilig im Vergleich zu Methanol, Methan und Hythan.

Vor allem im Hinblick auf günstigere Betriebskosten folgt synthetisches Methan als CNG-Ersatz. Zwar sind bei CNG-Fahrzeugen aufgrund des aufwendigeren Tanksystems die Anschaffungskosten im Vergleich zu Benzinfahrzeugen etwa 1.600 Euro höher (exkl. Mehrwertsteuer) [Kramer et al. 2021], allerdings liegen die Kraftstoffkosten für synthetisches Methan mit 13,5 Euro/100km mehr als 20 % niedriger als die für synthetisches Benzin. Mit der Annahme von 185.000 km Gesamtfahrleistung über die Fahrzeuglebensdauer, würde ein mit synthetischem Methan betriebenes CNG-Fahrzeug, unter Berücksichtigung von Anschaffungs- und Kraftstoffkosten, knapp 6.000 Euro günstiger sein, als ein mit synthetischem Benzin betriebenes Fahrzeug. Da mit 6 % Tankstellenverfügbarkeit (850 Tankstellen) die Infrastruktur nicht in dem gleichen Maße wie für konventionelle Flüssigkraftstoffe gegeben ist und die Reichweite von CNG-Fahrzeugen geringer ist als die von vergleichbaren Benzin-Fahrzeugen<sup>10</sup>, resultiert eine leicht schlechtere Gesamtbewertung im Vergleich zum synthetischen Benzin.

Durch den Wasserstoffanteil im Hythan sinkt zwar der Kraftstoffverbrauch (im Vergleich zu reinem Methan) durch den höheren Heizwert des Kraftstoffes, allerdings kompensiert dieser Effekt nicht die Mehrkosten des Wasserstoffes, weshalb die Kosten pro km im Vergleich zum rein mit Methan betriebenen Fahrzeug leicht ansteigen. In Verbindung mit der aktuell noch nicht verfügbaren Infrastruktur sowie den höheren Anforderungen an den Aufbau (kraftstoffführende Bauteile müssen für Wasserstoff-Anwendungen freigegeben sein), schließt Hythan im Vergleich zu CNG und synthetischem Benzin eher schlechter ab.

Synthetisches Methanol lässt sich nur in speziell für diesen Kraftstoff entwickelten Motoren verwenden<sup>11</sup>. Die angenommenen Mehrkosten bei der Fahrzeuganschaffung sind mit etwa 200 Euro allerdings nur geringfügig höher als für Benzinfahrzeuge, da hauptsächlich vergleichbare Komponenten verwendet werden können [Kramer et al. 2021]. Mit 1,48 Euro/kg stellt Methanol den günstigsten betrachteten strombasierten Kraftstoff dar (exkl. Energie- und Mehrwertsteuer). Der Verbrauch ist mit 10,45 kg/100km vergleichsweise hoch, woraus Kraftstoffkosten in Höhe 15,4 Euro/100km resultieren. Der hohe Kraftstoffverbrauch folgt aus der geringen Energiedichte des Methanols im Vergleich zum Benzin und ist ebenfalls ein Grund für die geringere Reichweite von Methanolfahrzeugen bei gleichem Tankvolumen. Aktuell besteht kein Tankstellennetz für Methanol in Deutschland. Allerdings ließen sich unter Annahme von Umrüstungskosten von rund 55.755 Euro pro Tankstelle bestehende Benzin oder Diesel-Zapfanlagen zur Bereitstellung von Methanol umrüsten [EA Engineering, Science, and Technology

<sup>10</sup> Eigene Auswertung auf Basis des Erdgas-Verbrenner-Kostenvergleichs des ADAC [Kroher 2021]

<sup>11</sup> BEniVer Fragebogen Nr. 2, Verbundpartner MEEMO



1999]. Durch einen vergleichsweise geringen Investitionsaufwand von rund 400 Mio. Euro ließen sich damit 50 % aller Tankstellen in Deutschland für Methanol umrüsten.

Die Nutzung von biogenen Kraftstoffen wie Biomethan schneidet aufgrund der im Vergleich zu den synthetischen Kraftstoffen deutlich geringeren Kraftstoffkosten als alternativer Kraftstoff am besten ab. Allerdings lässt sich Bio-Methan aufgrund der zur Herstellung benötigten Biomasse nicht beliebig skalieren und stellt an dieser Stelle keine vergleichbare Alternative für die in BEniVer betrachteten strombasierten Kraftstoffe dar. Dennoch stellt Biomethan für den vergleichsweise kleinen Bestand von CNG-Fahrzeugen<sup>12</sup> eine Alternative zum fossilen CNG dar. Bereits heute bietet das CNG-Tankstellennetz in Deutschland aktuell meist eine Mischung von biogenem und fossilem Methan, bzw. 100 % Biomethan an<sup>13</sup>.

### **Bereich leichte Nutzfahrzeuge**

Die Nutzung von DME und Diesel als Kraftstoff wird in BEniVer als generischer Kraftstoffpfad im leichten Nutzfahrzeug betrachtet. Die Handhabung von DME ist vergleichbar mit der von LPG<sup>14</sup>. Aktuell sind noch keine DME Tankstellen verfügbar. Unter der Annahme, dass der Preis für den Aufbau einer DME Tankmöglichkeit dem einer LPG Zapfanlage<sup>15</sup> entspricht, ist davon auszugehen, dass der Investitionsaufwand mit knapp 150 Mio. Euro vergleichsweise gering wäre, um 50 % aller Tankstellen in Deutschland mit einer DME Zapfanlage auszurüsten.

### **Bereich schwere Nutzfahrzeuge**

Die Bewertung der generischen strombasierten, biogenen und fossilen Kraftstoffe in schweren Nutzfahrzeugen (40 t zulässige Gesamtmasse) ist in Tabelle 4-11 dargestellt.

Unter den betrachteten strombasierten Kraftstoffen resultiert synthetischer Diesel als die attraktivste Option für die Anwendung im schweren Nutzfahrzeug für den Langstreckenverkehr. 100 % synthetischer Diesel erfüllt aufgrund der zu geringen Dichte zwar nicht die Norm EN 590 (Dieselkraftstoff), ist jedoch rückwärtskompatibel mit Bestandsfahrzeugen. Dadurch entstehen keine Mehrkosten bei der Fahrzeuganschaffung, bzw. ist keine Umrüstung des Fahrzeugs notwendig. Aufgrund der fehlenden Integration der EN 15940 (Norm für synthetische, paraffinische Dieselkraftstoffe) in die 10. BImSchV ist dies jedoch in Deutschland nicht möglich. Durch die Rückwärtskompatibilität mit der bestehenden Tankstelleninfrastruktur könnte, bei Einführung, diese weiterhin verwendet werden. Es müsste allerdings womöglich eine B7-Diesel-Schutzsorte weiterhin verfügbar sein. Da aktuell nicht klar ist, ob bestehende Zapfsäulen einfach umgewidmet werden oder neue dazukommen müssen, wird die Tankstellenverfügbarkeit für paraffinische Dieselkraftstoffe nach EN 15940 mit 0 bewertet. Durch den geringen Investitionsaufwand für eine ausreichende Tankstellenabdeckung von +4 steigt die Gesamtbewertung für die Tankstelleninfrastruktur auf +2. Die Reichweite und Betankungszeit sind identisch im Vergleich zur Nutzung von fossilem Diesel. Lediglich die Kraftstoffkosten sind mit 88,70 Euro/100km aufgrund der deutlich höheren Herstellungskosten nachteilig.

<sup>12</sup> CNG-Fahrzeuge stellen aktuell lediglich 0,2 % des Bestands an Pkw in Deutschland dar. Quelle: [KBA 2021a]

<sup>13</sup> Der BDEW zeigt einen Überblick der aktuellen Standorte von Bio-Erdgastankstellen in Deutschland. Quelle: [BDEW 2022a]

<sup>14</sup> BEniVer Fragebogen Nr. 2, Verbundpartner FlexDME

<sup>15</sup> Eigene Annahme von 20.000 Euro für eine LPG / DME Zapfsäule auf Basis von [Dohrmann 2009]

**Tabelle 4-11:** Bewertungsübersicht generische Pfade, Integration ins Verkehrssystem: Bereich SNF (Kosten exkl. MWSt und EnergieSt)

Kraftstoffpfad		MKS_Ö_Diesel_#1	MKS_B_HVO_#1	MKS_G_CH4_#2	GEN_Diesel_#1	GEN_LNG_#2	GEN_Methanol_#2
Kraftstoff		Diesel	Diesel	Methan	Diesel	Methan (LNG)	Methanol
<b>Kosten der Fahrzeughaltung</b>	Anschaffungskosten	+4	+4	-3	+4	-3	+4
	Kraftstoffkosten	+3	+2	+4	-4	-3	-4
	Fahrzeug- und Kraftstoffkosten	+4	+3	+4	-3	-2	-4
	<b>gesamt</b>	<b>+4</b>	<b>+3</b>	<b>+4</b>	<b>-3</b>	<b>-2</b>	<b>-4</b>
<b>Tankvorgang</b>	Betankungszeit	+4	+4	+4	+4	+4	+4
	Reichweite pro Tankvorgang	+4	+4	-2	+4	-1	-2
	<b>gesamt</b>	<b>+4</b>	<b>+4</b>	<b>+1</b>	<b>+4</b>	<b>+2</b>	<b>+1</b>
<b>Tankinfrastruktur</b>	Tankstellenverfügbarkeit	+4	0	+1	0	+1	-4
	Investitionsaufwand für ausreichende Tankstellenabdeckung	+4	+4	0	+4	0	+3
	<b>gesamt</b>	<b>+4</b>	<b>+2</b>	<b>+1</b>	<b>+2</b>	<b>+1</b>	<b>-1</b>
<b>Kosten der Fahrzeughaltung (2018)</b>	Anschaffungskosten	110.891 €	110.891 €	126.793 €	110.891 €	126.793 €	111.107 €
	Kraftstoffkosten in €/100km	20,30	30,60	13,70	88,70	76,80	90,40
	Fahrzeug- und Kraftstoffkosten	281.554 €	368.242 €	241.850 €	855.939 €	772.124 €	870.114 €
<b>Tankvorgang</b>	Betankungszeit (min/100km)	0,3	0,3	0,4	0,3	0,3	0,7
	Reichweite pro Tankvorgang (km)	3.552	3.506	1.625	3.506	2.011	1.559
<b>Tankinfrastruktur</b>	Tankstellenverfügbarkeit	100%	(5%)	15%	100%	15%	0%
	Investitionsaufwand für ausreichende Tankstellenabdeckung	0 Mio. €	37 Mio. €	711 Mio. €	0 Mio. €	711 Mio. €	37 Mio. €

Mit strombasiertem Methan betriebene schwere Nutzfahrzeuge folgen dem generischen Diesel vor allem wegen der geringeren Betriebskosten. Der größte Nachteil des zum Transport verflüssigten Kraftstoffes Methan liegt allerdings darin, dass aufgrund des aufwendigeren Tanksystems die maximal mitführbare Kraftstoffmenge begrenzt ist (aktuell maximal 500 kg), woraus eine geringere Reichweite im Vergleich zum Dieselmethan resultiert. Ebenfalls ist die LNG-Tankstelleninfrastruktur noch nicht weit genug ausgebaut, um mit der bestehenden Infrastruktur für Diesel-Fahrzeuge konkurrenzfähig zu sein.

Synthetisches Methanol ist zwar 55 % günstiger als synthetischer Diesel, allerdings ist der Verbrauch von schweren Nutzfahrzeugen bei der Verbrennung von Methanol aufgrund des geringeren Heizwertes auch mehr als doppelt so hoch. In der Folge steigt der Kraftstoffpreis

und ebenfalls halbiert sich die Reichweite beim Betrieb mit synthetischem Methanol. Dies und die Tatsache, dass aktuell noch keine verfügbare Methanol-Tankstelleninfrastruktur vorhanden ist sowie die fehlende Umrüstbarkeit bestehender Dieselmotoren, spricht gegen den Einsatz von synthetischem Methanol im schweren Nutzfahrzeugsbereich.

Hydrierte Pflanzenöle (HVO, Hydrotreated Vegetable Oils) erfüllen zwar nicht als Reinkraftstoff die Norm EN 590 (Dieselkraftstoff), allerdings sind viele konventionelle Dieselmotoren bereits offiziell für den Betrieb mit HVO zugelassen und in Europa ist es bereits an mehr als 600 Tankstellen möglich, HVO zu tanken [Audi MediaCenter 2022]. Aufgrund der fehlenden Integration der EN 15940 (Norm für synthetische, paraffinische Dieselkraftstoffe) in die 10. BImSchV ist dies jedoch in Deutschland aktuell nicht möglich. Die Reichweite und die Betankungsdauer sind vergleichbar mit konventionellem Diesel. Lediglich die Kraftstoffkosten sind bei der Nutzung von HVO aufgrund der höheren Herstellungskosten im Vergleich zum fossilen Referenzkraftstoff nachteilig. Konkret liegen die Kraftstoffkosten von HVO im Vergleich zu fossilem Diesel etwa 50 % höher [Landälv et al. 2018]. Aufgrund der fehlenden Skalierbarkeit der HVO-Herstellung durch die begrenzte Verfügbarkeit der benötigten Biomasse, lässt sich HVO allerdings nicht mit den beliebig skalierbaren strombasierten Kraftstoffen vergleichen.

### **Bereich Schifffahrt**

#### **Kosten für Betreiber (Anschaffung und Kraftstoff)**

Tabelle 4-12 zeigt die Abschätzung für Anschaffungs- und Kraftstoffkosten in der Schifffahrt auf Basis dessen die Bewertung hier erfolgt. Die eigentliche Bewertung ist in Tabelle 4-13 gezeigt. Analog des bodengebundenen Verkehrs ergibt sich die für die Bewertung zugrunde liegende Skala aus den niedrigsten und höchsten Anschaffungs- und Kraftstoffkosten. Daher ergibt sich für fossiles Erdgas mit 17,99 €/100km eine Bewertung von +4, für synthetischen Diesel mit 232,32 €/100km eine -4. Alle anderen Kraftstoffe ordnen sich entsprechend dazwischen ein. Bei den Anschaffungskosten ist es etwas übersichtlicher: mit Dieselkraftstoffen betriebene Schiffe sind günstiger als mit Erdgas betriebene Schiffe, wodurch sich die obere und untere Grenze für die Anschaffung ergibt.

Für die Abschätzung der Anschaffungs- und Kraftstoffkosten wird entsprechend des Methodikleitfadens [Pichlmaier et al. 2021] bzw. der generischen Annahmen (siehe Kapitel 2.2.5) ein Containerschiff der Größe 43.000 DWT mit einer Lebensdauer von 25 Jahren und in dieser Zeit zurückgelegten Distanz von 1.040.250 nautischen Meilen (1,93 Mio. km) als Referenz herangezogen. Die in Tabelle 4-12 angegebenen Anschaffungskosten basieren auf den Arbeiten von [Eschmann 2020; Taljegard et al. 2014; Horvath et al. 2018]. Aufgeführt sind auch die angenommenen Kraftstoffkosten und Verbräuche, jeweils für das Jahr 2018. Verbräuche für Diesel und Erdgas bzw. Methan entsprechen den BEniVer-Rahmenannahmen, alle übrigen ergeben sich aus den Heizwerten unter der Annahme, dass das Schiff die gleiche Distanz zurücklegen soll.

Für die Anwendung von synthetischem **LNG** und **synthetischem Dieselkraftstoff** sind keine großen technologischen Neuerungen notwendig, sodass sich hier die Anschaffungskosten nicht von den bisher vorhandenen Schiffen unterscheiden. Auch die Technologie für ein mit **Methanol** betriebenes Schiff ist ausgereift, sodass hier in der Anschaffung keine großen zusätzlichen Kosten für Entwicklung u.ä. hinzukommen. Während die Kosten für ein mit Methanol

betriebenes Schiff im Bereich eines Dieselschiffes liegen, ist ein mit LNG betriebenes Schiff um etwa 30 % teurer als eines mit Dieselmotor, wenn es die gleiche Reichweite aufweisen soll. Für **Ammoniak** wird angenommen, dass die Anschaffungskosten mindestens im Bereich von LNG-Schiffen liegen. Die Mehrkosten für den Betrieb mit den synthetischen Kraftstoffen ergeben sich allerdings überwiegend aus deren wesentlich höheren Gestehungskosten (siehe dazu die Bewertung von Ammoniak im Kapitel 4.2). Analog zur Bewertung für den Verkehrsbereich Straße, fließen in die finale Bewertung daher nur die Kraftstoffkosten ein.

**Tabelle 4-12:** Abschätzung zu Anschaffungs- und Kraftstoffkosten in der Schifffahrt; die absoluten Kraftstoffkosten beziehen sich auf die Gesamtkraftstoffkosten während der Lebensdauer von 25 Jahren angenommen zurückgelegten Distanz des Referenzschiffes von 1,93 Mio. km [Pichlmaier et al. 2021].

	Anschaffung	Kraftstoffkosten und -verbrauch (2018)				ΣKosten
	Mio. €	€/kg	kg/km	€/km	Mio. €	Mio. €
<b>GEN_Ammoniak_#1</b>	> 58,12 €	1,56	109,64	171,04	329,52 €	387,64 €
<b>Gen_Diesel_#3</b>	40,10 €	3,57	65,01	232,32	447,58 €	487,68 €
<b>Gen_Methanol_#3</b>	41,66 €	1,48	134,67	198,89	383,17 €	424,84 €
<b>Gen_Methan_#3</b>	58,12 €	3,12	58,05	181,34	349,36 €	407,47 €
<b>MKS_Ö_Diesel_#2</b>	40,10 €	0,57	65,01	37,06	71,39 €	111,49 €
<b>MKS_G_CH4_#3</b>	58,12 €	0,31	58,05	17,99	34,67 €	92,78 €

### Tankvorgang

Die Bewertung der Betankung zeigt (siehe Tabelle 4-13), dass ein synthetischer Kraftstoff keinen Einfluss auf die Betankungsdauer hat. Einzig für **Ammoniak** wird angenommen, dass höhere Sicherheitsvorkehrungen einen etwas größeren Aufwand bedeuten. Die Bewertung der Reichweite in Tabelle 4-13 erfolgt hier in Anlehnung an die Kriterien Verbrauch und Energieinhalt aus dem Bereich Kraftstoffnutzung. Der Energiegehalt ist bei Ammoniak, **LNG** und **Methanol** deutlich geringer als bei **Dieselmotoren**. Daraus resultiert zwar eine geringere Reichweite, jedoch sei an dieser Stelle angemerkt, dass die Schiffe für einen bestimmten Einsatzzweck konstruiert und der Motor entsprechend ausgelegt wurde. Während bei einem mit synthetischem Methan betankten Schiff keine Reichweitenminderung im Vergleich zu einem mit fossilem LNG betankten Schiff zu erwarten ist, kann sich beim Vergleich von synthetischen Schiffsdiesel und Marine Gas Oil (MGO) durchaus ein Unterschied ergeben. Durch eine effizientere Verbrennung und geeignete Motorsteuerung wird aber erwartet, dass dies kein nennenswertes Problem darstellt.

Verfügbarkeit Tankstellen

Auch die Bewertung der Tankstellenverfügbarkeit ist in Tabelle 4-13 zu sehen. Die für **LNG** und **Diesel** vorhandene Infrastruktur kann genutzt werden. Eventuell muss berücksichtigt werden, dass z. B. aus Kostengründen, oder bei Bedenken hinsichtlich der Kompatibilität, nicht jedes Schiff mit dem synthetischen Kraftstoff betankt werden sollte. Da **Methanol** eine Grundchemikalie der Chemieindustrie ist, und in Einzelfällen auch schon als Kraftstoff eingesetzt wird, ist auch hierfür eine Infrastruktur bereits vorhanden, welche ausgebaut werden müsste. Der Aufwand hierfür lässt sich allerdings schwer abschätzen, da auch der Bedarf noch nicht absehbar ist. Ähnliches gilt für die Infrastruktur für **Ammoniak**. Im Unterschied zum Methanol befindet sich die Anwendung noch im Forschungsstadium, sodass hier keinerlei Tankstellen vorhanden sind.

**Tabelle 4-13:** Bewertung der Referenzpfade für die Schifffahrt hinsichtlich der Integration ins Verkehrssystem

Kraftstoffpfad		Syn_Ammoniak_Schiff	Syn_Diesel_Schiff	Syn_LNG_Schiff	Syn_Methanol_Schiff	Fossil_LNG_Schiff	Fossil_Diesel_Schiff
Kraftstoff		100 % Ammoniak	100 % FT-Diesel	100 % Methan	100 % Methanol	100 % Erdgas	100 % fossiler Schiffsdiesel
Kosten für Betreiber (Anschaffung und Kraftstoff)	Anschaffungskosten	-4	+4	-4	+3	-4	+4
	Kraftstoffkosten	-2	-4	-3	-3	+4	+3
	<b>gesamt</b>	<b>-2</b>	<b>-4</b>	<b>-3</b>	<b>-3</b>	<b>+4</b>	<b>+3</b>
Tankvorgang	Betankungsdauer	+3	+4	+4	+4	+4	+4
	Reichweite	-2	+3	+1	-1	+1	+4
	<b>gesamt</b>	<b>+1</b>	<b>+4</b>	<b>+3</b>	<b>+2</b>	<b>+3</b>	<b>+4</b>
Verfügbarkeit Tankstellen	Verfügbarkeit Tankstellen / Tankmöglichkeiten	-4	+4	+4	-1	+4	+4
	Aufwand für ausreichende Tankstellenabdeckung	0	+4	+4	0	+4	+4
	<b>gesamt</b>	<b>-2</b>	<b>+4</b>	<b>+4</b>	<b>-1</b>	<b>+4</b>	<b>+4</b>

### Bereich Luftfahrt

#### Kosten für Betreiber (Anschaffung und Treibstoff)

Die in Tabelle 4-14 angegebenen Anschaffungskosten wurden mit Hilfe der Direct Operation Costs (DOC) [CeRas] bestimmt und geben eine Abschätzung der Investitionskosten für einen Airbus A330-200, welcher analog dem Methodikleitfaden [Pichlmaier et al. 2021] als Referenzflugzeug dient (siehe auch generische Annahmen im Kapitel 2.2.5). Für die Bewertung wird die Mittelstrecke mit 3.300 km betrachtet. Die Treibstoffkosten wurden entsprechend dessen Verbrauch bestimmt, wofür eine Lebensflugleistung von 111 Mio. km angenommen wurde. Synthetisches Kerosin, welches aus dem Fischer-Tropsch-Prozess stammt, ist als **50 %-Mischung** für den Einsatz in bestehenden Flugzeugen zugelassen, daher ergeben sich hier keine höheren Anschaffungskosten im Vergleich zu dem rein fossilen Treibstoff. Der Einsatz eines rein synthetischen Kerosins, was auch als **SAF** (Sustainable Aviation Fuel) bezeichnet wird, ist hingegen noch nicht möglich. Da gegenwärtig davon ausgegangen wird, dass auch hier für den Einsatz keine kompletten, neuentwickelten Triebwerke notwendig sind, sondern lediglich einzelne Anpassungen an Materialien, Dichtungen und/oder Ventilen, sind keine nennenswerten Mehrkosten bei der Anschaffung zu erwarten. Mehrkosten für den Betreiber entstehen daher ausschließlich durch die höheren Treibstoffkosten, sodass auch hier die Bewertung nur auf Basis der Treibstoffkosten erfolgt (siehe Tabelle 4-14). Aufgrund der hohen Herstellungskosten (basierend auf den für das generische Kerosin bestimmten Gestehungskosten) betragen diese für ein reines, strombasiertes SAF derzeit ein Vielfaches (ca. das 6-fache) der Kosten für fossiles Kerosin. Die Kosten für die 50 %-Mischung liegt hier entsprechend bei dem etwa 3-fachen im Vergleich zum fossilen Treibstoff.

**Tabelle 4-14:** Abschätzung zu Anschaffungs- und Treibstoffkosten in der Luftfahrt für einen Airbus A330-200; die absoluten Treibstoffkosten beziehen sich auf die Gesamttreibstoffkosten während der Lebensdauer von 30 Jahren angenommen zurückgelegten Distanz des Referenzflugzeuges von 111 Mio. km [Pichlmaier et al. 2021].

	Anschaffung	Treibstoffkosten und -verbrauch (2018)				ΣKosten
	Mio. €	€/kg	kg/km	€/km	Mio. €	Mio. €
<b>Gen_Kerosin_#1 (50 %-Mischung)</b>	74,48 €	2,08	8,82	18,32	2033,98 €	2108,46 €
<b>Gen_Kerosin_#2 (100 % SAF)</b>	74,48 €	0,57	8,82	31,63	3510,48 €	3584,95 €
<b>MKS_Ö_Kerosin_#1</b>	74,48 €	3,59	8,82	5,02	557,49 €	631,96 €

#### Tankvorgang

Hinsichtlich des Betankungsvorgangs und der Reichweite unterscheidet sich ein SAF weder als 50%-Blend noch in Reinform vom fossilen Kerosin (siehe Bewertung in Tabelle 4-15). Aufgrund der geringeren Stoffdichte, ist die volumetrische Energiedichte eines reinen SAF zwar

etwas geringer als beim fossilen Kerosin. Aufgrund seiner Zusammensetzung wird aber angenommen, dass reines SAF sogar effizienter verbrannt werden kann, sodass der Nachteil der etwas geringeren Dichte hier ausgeglichen wird.

### Verfügbarkeit Tankstellen

Die Erfüllung der ASTM-Norm D7566 für den 50%-Blend garantiert, dass eine problemlose Integration in die bestehende Infrastruktur möglich ist. Eventuell kann es aber Gründe geben, dass nicht jedes Flugzeug mit einem synthetischen Kerosin betankt werden soll (z.B. Kosten), weswegen hier bei der Bewertung in Tabelle 4-15 jeweils ein Punkt abgezogen wurde. Aufgrund seiner chemischen Ähnlichkeiten würde gleiches auch für reines SAF gelten, sofern es zugelassen wäre.

**Tabelle 4-15:** Bewertung der Referenzpfade für die Luftfahrt hinsichtlich der Integration ins Verkehrssystem

Kraftstoffpfad		Syn_SAF50_Luft	Syn_SAF100_Luft	Fossil_Kerosin_Luft
		50 % <sub>vol</sub> SAF + 50 % <sub>vol</sub> fossiles Kerosin	100 % SAF	100 % fossiles Kerosin
<b>Kraftstoff</b>	Anschaffungskosten	+4	+3	+4
	Kraftstoffkosten	0	-4	+4
	<b>gesamt</b>	<b>0</b>	<b>-4</b>	<b>+4</b>
<b>Kosten für Betreiber (Anschaffung und Kraftstoff)</b>	Betankungsdauer	+4	+4	+4
	Reichweite	+4	+4	+4
	<b>gesamt</b>	<b>+4</b>	<b>+4</b>	<b>+4</b>
<b>Tankvorgang</b>	Verfügbarkeit Tankstellen / Tankmöglichkeiten	+3	+3	+4
	Aufwand für ausreichende Tankstellenabdeckung	+3	+3	+4
	<b>gesamt</b>	<b>+3</b>	<b>+3</b>	<b>+4</b>

**Bereich Rückverstromung****Kosten für Betreiber (Anschaffung und Treibstoff)**

Im Gegensatz zu **synthetischem Methan** besteht **fossiles Erdgas** nicht nur aus Methan. Für die Anwendung in Gasturbinen zur Energiegewinnung ist das allerdings unproblematisch, da diese hinsichtlich des verwendeten Brennstoffes flexibel sind. Daher entstehen in der Anschaffung keine Mehrkosten und auch die vorhandene Infrastruktur zur Gasversorgung kann genutzt werden. Nur hinsichtlich der Kraftstoffkosten ergeben sich Unterschiede, da das strombasierte Methan ein Vielfaches des fossilen Erdgases kostet (siehe Gestehungskosten in Tabelle 4-16). Die Kosten für **Biomethan** sind im Vergleich zum strombasierten Methan nur geringfügig teurer als Erdgas, was sich in der Bewertung (Tabelle 4-17) widerspiegelt.

**Tabelle 4-16:** Vergleich der Gestehungskosten für synthetisches Methan, Biogas und fossiles Erdgas basierend auf den Analysen der Kraftstoffherstellung

Kraftstoffpfad	Kosten €/kg
Gen_Methan_#4	2,67
MKS_B_CH4_#2	0,64
MKS_G_CH4_#4	0,35



**Tabelle 4-17:** Bewertung der Referenzpfade für die Rückverstromung hinsichtlich der Integration ins Verkehrssystem

Kraftstoffpfad		Syn_CNG_Strom	Bio_CNG_Strom	Fossil_CNG_Strom
		100 % Methan	100 % Biogas	100 % Erdgas
Kraftstoff				
Kosten für Betreiber (Anschaffung und Kraftstoff)	Anschaffungskosten	+4	+4	+4
	Kraftstoffkosten	-4	+3	+4
	<b>gesamt</b>	<b>-4</b>	<b>+3</b>	<b>+4</b>
Tankvorgang	Betankungsdauer	+4	+4	+4
	Reichweite	+4	+4	+4
	<b>gesamt</b>	<b>+4</b>	<b>+4</b>	<b>+4</b>
Verfügbarkeit Tankstellen	Verfügbarkeit Tankstellen / Tankmöglichkeiten	+4	+4	+4
	Aufwand für ausreichende Tankstellenabdeckung	+4	+4	+4
	<b>gesamt</b>	<b>+4</b>	<b>+4</b>	<b>+4</b>

### Infrastruktur

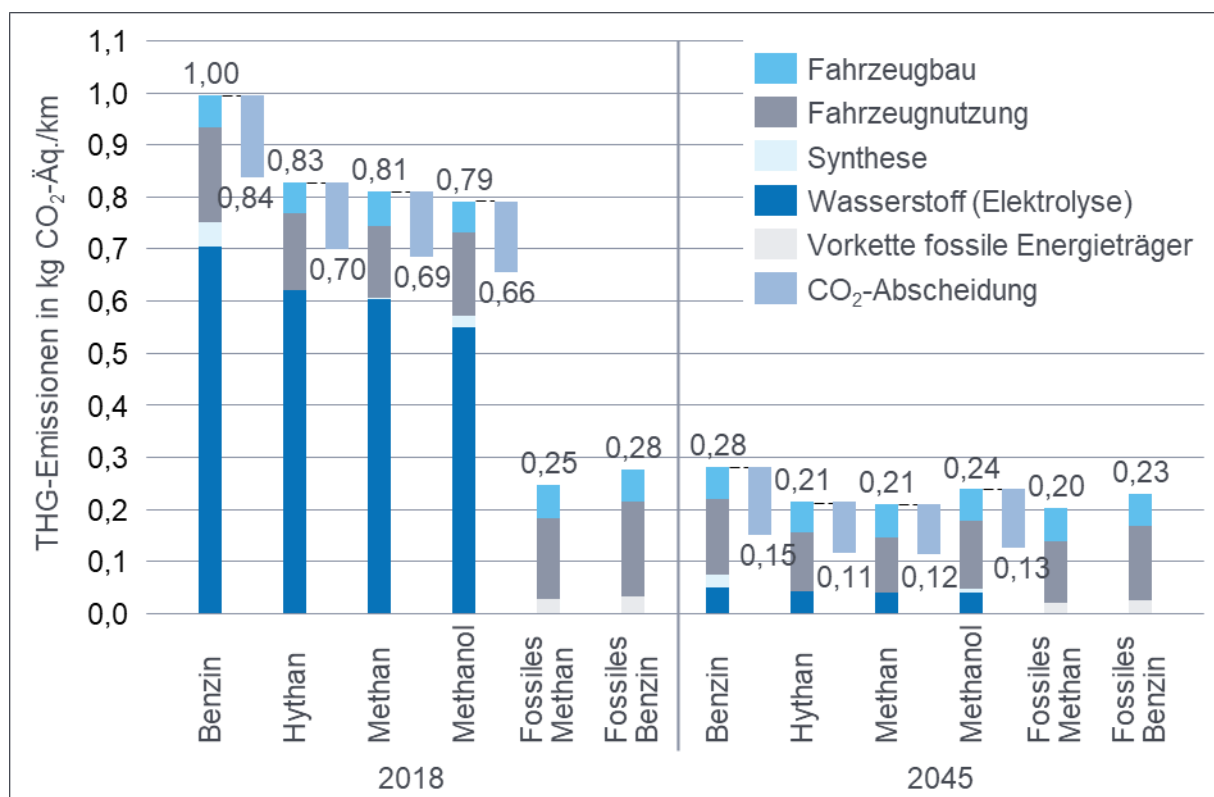
Die Kriterien Tankvorgang und Tankstellenverfügbarkeit sind hier unter der Bezeichnung Infrastruktur zusammengefasst. Da es sich um eine stationäre Anwendung handelt und sowohl synthetisches Methan als auch Biomethan dem Erdgas ähnlich sind, können die alternativen Brennstoffe fossiles Erdgas im Bereich der Energieversorgung vollständig ersetzen (siehe Bewertung in Tabelle 4-17).

## 4.5 Ökologische Bewertung

Das folgende Kapitel zeigt die Bewertungen der generischen Pfade hinsichtlich der ökologischen Kriterien. Hier sei daran erinnert, dass die folgenden Analysen den Fokus auf die Emissionen langlebiger Treibhausgase richten. Kurzlebige Emissionskomponenten fließen über den Bereich der Kraftstoffnutzung ein (siehe Kapitel 4.3), werden im Zusammenhang mit der Kraftstoffherstellung aus den in Kapitel 0 angeführten Gründen jedoch vernachlässigt.

### Bereich Pkw

Im Bereich Pkw werden für die generischen Pfade die synthetischen Kraftstoffe Benzin, Hythan, Methan und Methanol bewertet. In Abbildung 4-6 sind die Auswertungen in Form einer Beitragsanalyse dargestellt.



**Abbildung 4-6:** Treibhausgasemissionen pro Kilometer über den gesamten Lebenszyklus, Bereich Pkw

Da viele Ergebnisabbildungen der LCAs gleich aufgebaut sind, wird im Folgenden der allgemeine Aufbau der Abbildung erklärt. Auf der linken Seite der Abbildung befinden sich die Ergebnisse für das Jahr 2018. Die rechte Seite zeigt das Jahr 2045. Zwischen beiden Jahren verändert sich beispielsweise der Strommix des deutschen Energiesystems, die Effizienz der Elektrolyse oder die Effizienz im Verbrennungsmotor des Pkws. Prozesse, die auf Hintergrundannahmen basieren, wie beispielsweise die Herstellung von energietechnischen Anlagen oder

der Fahrzeugbau, werden über die Jahre nicht angepasst. Die Abbildung zeigt sowohl die synthetischen Kraftstoffe als auch die fossilen Referenzkraftstoffe. Die Gesamtemissionen setzen sich aus folgenden Bestandteilen zusammen:

- Fahrzeugbau: Aufwände für den Bau des Fahrzeuges (z.B. Abbau und Verarbeitung von Materialien).
- Fahrzeugnutzung: Emissionen beim Betrieb des Fahrzeuges. Dies sind hauptsächlich Verbrennungsemissionen, aber auch Aufwände für die Wartung des Fahrzeuges oder die Abnutzung der Straße.
- Synthese: Emissionen, die durch Materialaufwände oder den Stromverbrauch in der Synthese entstehen.
- Wasserstoff (Elektrolyse): Aufwände für die Herstellung der Anlage und Bereitstellung von Betriebsstoffen. Hauptverursacher der Emissionen ist der Bezug von Strom, dessen Emissionen maßgeblich von der Zusammensetzung des Strommixes im jeweiligen Jahr abhängen.
- Vorkette fossile Energieträger (nur für fossile Kraftstoffe relevant): Emissionen aus der Gewinnung, Aufbereitung und Transport von fossilen Energieträgern.
- CO<sub>2</sub>-Abscheidung: Beinhaltet sowohl die negativen Emissionen, die durch das Abscheiden von CO<sub>2</sub> aus Abgas oder der Luft entstehen, als auch die Aufwände (wie beispielsweise der Strombedarf), die für die Abscheidung notwendig sind.

Von den Balken können zwei Summen abgelesen werden: So ergeben sich am Beispiel von Benzin entweder Gesamtemissionen von 1,00 kg CO<sub>2</sub>-Äq/km, wenn die Aufwände und Gut-schrift aus der CO<sub>2</sub>-Abscheidung dem Kraftstoff nicht gutgeschrieben werden oder 0,84 kg CO<sub>2</sub>-Äq/km, wenn die CO<sub>2</sub>-Abscheidung berücksichtigt wird. Für die Bewertung in der Bewertungsmatrix wird das Ergebnis inklusive CO<sub>2</sub>-Abscheidung verwendet.

Die Ergebnisse für den Bereich Pkw zeigen, dass die Emissionen für die synthetischen Kraftstoffe im Jahr 2018 deutlich über den fossilen Referenzen liegen. Das ist vor allem auf den hohen Beitrag der Wasserstoffelektrolyse zurückzuführen, welche maßgeblich durch die Emissionen des Stromverbrauchs verursacht werden. In einem erneuerbaren Energiesystem in 2045 verringert sich der Anteil der Emissionen durch die Wasserstoffbereitstellung dagegen deutlich. Wenn die negativen Emissionen durch CO<sub>2</sub>-Abscheidung berücksichtigt werden, liegen die Gesamtemissionen der synthetischen Kraftstoffe in diesem Jahr unter den fossilen Referenzen. Allgemein zeigt sich, dass die Emissionen für Benzin etwas höher ausfallen als für Hythan, Methan und Methanol. Verantwortlich dafür ist zum einen der erhöhte Aufwand für die Produktion des Kraftstoffes (Elektrolyse, Synthese und CO<sub>2</sub>-Bereitstellung) und zum anderen ein anderer Kraftstoffverbrauch im Fahrzeug. Dieser Zusammenhang ist in der folgenden Tabelle zusammengefasst.

**Tabelle 4-18:** Zusammenhang zwischen Emissionen der Herstellung des Kraftstoffes (Elektrolyse, Synthese und CO<sub>2</sub>-Abscheidung) und Verbrauch

Kraftstoff	Benzin	Hythan	Methan	Methanol
Emissionen für Kraftstoffbereitstellung in kg CO <sub>2</sub> -Äq./kg	11,2	10,6	10,2	4,1
Verbrauch in kg/100 km	5,2	4,6	4,7	10,5
Emissionen für Kraftstoffbereitstellung in kg CO <sub>2</sub> -Äq./km	0,58	0,49	0,48	0,43

Benzin verursacht in der Herstellung höhere Emissionen, da die Effizienz der Synthese etwas geringer ist als bei den anderen betrachteten Kraftstoffen. Außerdem ist der Verbrauch höher als bei Hythan und Methan. Durch den erhöhten Verbrauch und die etwas höheren Emissionen in der Herstellung des Kraftstoffes, kommt Benzin auf insgesamt höhere Emissionen je Kilometer als die beiden Gase. Bei Methanol gleichen sich beide Effekte aus. Methanol verursacht zwar geringe Emissionen pro kg Kraftstoff, allerdings wird deutlich mehr Kraftstoff gebraucht, um einen Kilometer zurückzulegen. Wichtig bei der Interpretation der Ergebnisse ist es zu beachten, dass der Transportweg und somit potenzielle Methanemissionen durch Schlupf nicht betrachtet werden.

Ergänzend zu den THG-Emissionen werden auch die anderen Kriterien, also der fossile, kumulierte Energieaufwand und der Ursprung des verwendeten CO<sub>2</sub> bewertet. Außerdem werden neben synthetischen und fossilen Kraftstoffen auch biogene Kraftstoffe bewertet. Die folgende Tabelle zeigt die vollständige Bewertung der einzelnen Pfade im Vergleich.

**Tabelle 4-19:** Ökologische Bewertung der generischen Kraftstoffe im Bereich Pkw

Kraftstoffpfad	Syn_Benzin_Pkw	Syn_Hythan_Pkw	Syn_CNG_Pkw	Syn_Methanol_Pkw	Bio_CNG_Pkw	Fossil_CNG_Pkw	Fossil_Benzin_Pkw
Kraftstoff	100 % FT-Benzin	30 % Vol Wasserstoff + 70 % Vol Methan	100 % Methan	100 % Methanol	100 % Biogas	100 % Erdgas	100 % fossiles Benzin
Treibhausgasemissionen 2018	-3	-2	-1	-1	+3	+3	+2
Treibhausgasemissionen 2030	+2	+3	+3	+3	+4	+3	+2
Treibhausgasemissionen 2045	+3	+4	+4	+4	+4	+3	+3
Kumulierter Energieaufwand 2018	-4	-2	-2	-2	+4	+1	+1
Kumulierter Energieaufwand 2030	+1	+2	+2	+2	+4	+2	+2
Kumulierter Energieaufwand 2045	+3	+3	+3	+3	+4	+2	+2
Ursprung des verwendeten CO <sub>2</sub>	0	0	0	0	n.a.	n.a.	n.a.

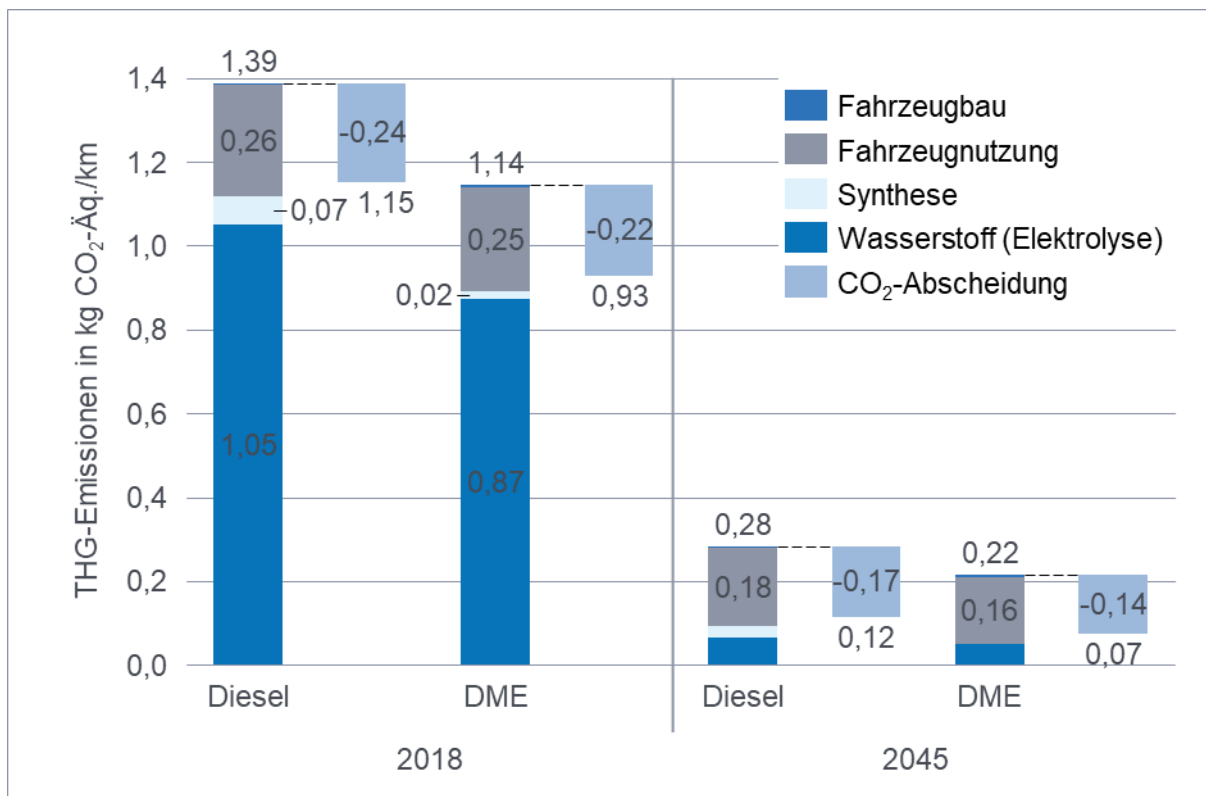
Die Bewertung zeigt für den kumulierten Energieaufwand und die THG-Emissionen eine ähnliche Bewertung je Kraftstoff und Jahr. Der kumulierte Energieaufwand wird, genauso wie die THG-Emissionen, maßgeblich vom Strommix beeinflusst, weshalb sich eine ähnliche Verbesserung der synthetischen Kraftstoffe von 2018 auf 2045 zeigt.

Biogenes Methan (Bio\_CNG\_Pkw) schneidet in jedem Jahr sowohl bei den THG-Emissionen, als auch beim kumulierten Energieaufwand sehr gut ab. Bei der Bewertung von biogenen Kraftstoffen ist allerdings zu beachten, dass die tatsächliche Klimawirkung maßgeblich von der biogenen Quelle abhängt und hier nur ein Mittelwert für verschiedene biogene Quellen abgebildet ist. Außerdem sind biogene Quellen durch die Nutzungskonkurrenz zur Lebensmittelproduktion nur begrenzt verfügbar.

Bei der Bewertung des Ursprungs des verwendeten CO<sub>2</sub> ist zu beachten, dass dieses Bewertungskriterium auf Kraftstoffe bei denen kein CO<sub>2</sub> abgeschieden wird (fossile und biogene Kraftstoffe) nicht angewendet werden kann. Für die generischen Pfade wird die durchschnittliche generische Kohlenstoffquelle, wie in Kapitel 2.2.5 dargestellt, angenommen. Die Bewertung der einzelnen Technologien wird anhand der Anteile der verschiedenen Technologien gewichtet. So ergibt sich die Bewertung von null für alle generischen Pfade.

### Bereich leichte Nutzfahrzeuge

Für die generischen Pfade werden synthetischer Diesel und DME in leichten Nutzfahrzeugen bewertet. Die Ergebnisse der Auswertung sind in Abbildung 4-7 dargestellt.



**Abbildung 4-7:** THG-Emissionen pro Kilometer über den gesamten Lebenszyklus, Bereich leichte Nutzfahrzeuge

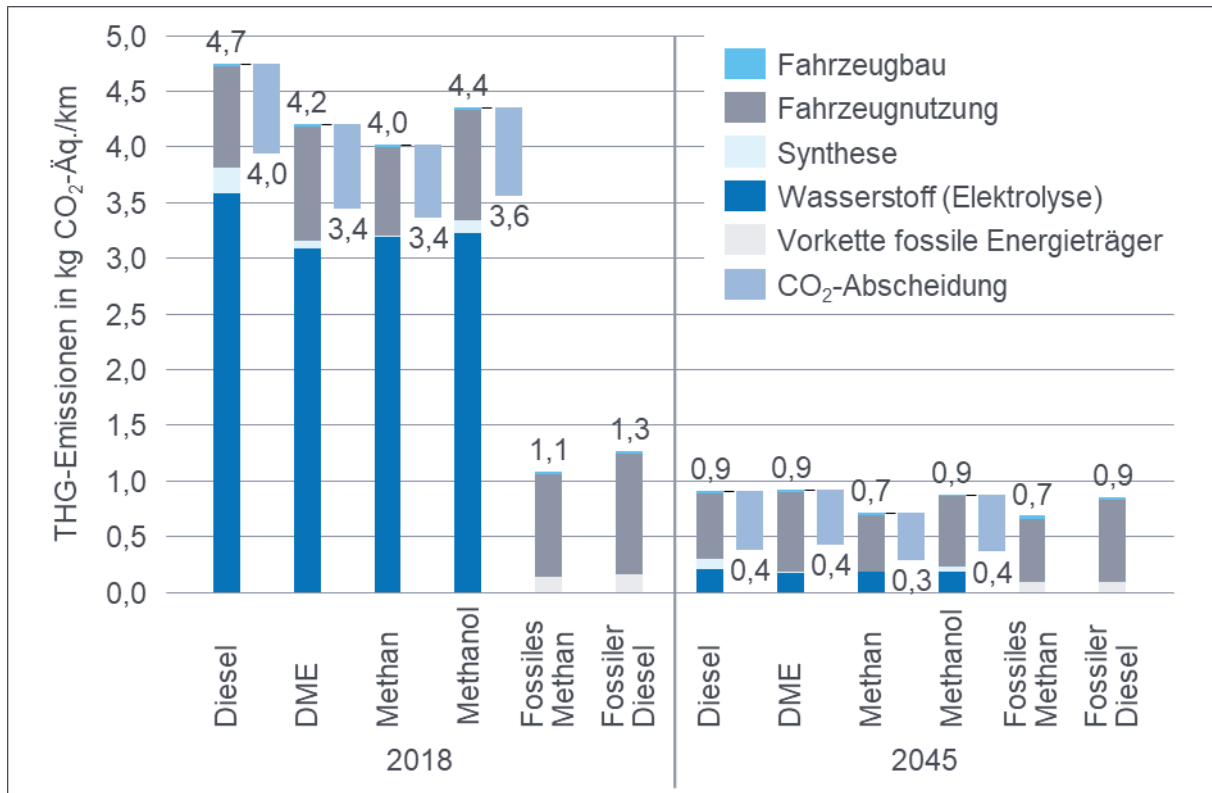
Im Vergleich der THG-Emissionen über den gesamten Lebensweg, schneidet DME etwas besser ab als Diesel. In diesem Bereich wird kein fossiler Pfad betrachtet. Tabelle 4-20 zeigt die Bewertung der beiden Pfade

**Tabelle 4-20:** Ökologische Bewertung der generischen Kraftstoffe im Bereich leichte Nutzfahrzeuge

Kraftstoffpfad	Syn_Diesel_Lnf	Syn_DME_Lnf
Kraftstoff	100 % FT-Diesel	100 % DME
Treibhausgasemissionen 2018	-4	-2
Treibhausgasemissionen 2030	+2	+3
Treibhausgasemissionen 2045	+3	+4
Kumulierter Energieaufwand 2018	-4	-2
Kumulierter Energieaufwand 2030	+1	+2
Kumulierter Energieaufwand 2045	+3	+4
Ursprung des verwendeten CO <sub>2</sub>	0	0

### Bereich schwere Nutzfahrzeuge

Für schwere Nutzfahrzeuge ergeben sich die in Abbildung 4-8 dargestellten THG-Emissionen.



**Abbildung 4-8:** THG-Emissionen pro Kilometer über den gesamten Lebenszyklus, Bereich schwere Nutzfahrzeuge

Die Abbildung zeigt, ähnlich wie bei den Pkws, dass die synthetischen Kraftstoffe im Jahr 2018 deutlich mehr THG-Emissionen verursachen als ihre fossilen Referenzen. Ebenfalls liegen die Emissionen des auf Syncrude basierenden Diesels über den Emissionen der anderen synthetischen Kraftstoffe. Die Unterschiede zwischen den Kraftstoffen sind im Jahr 2018 allerdings höher als im Jahr 2025, in welchem die Abweichungen zwischen Diesel, DME und Methanol beispielsweise erst mit der zweiten Nachkommastelle bemerkbar wären. Durch den geringeren Emissionsfaktor von Strom, wirken sich die Effizienzunterschiede der Herstellungspfade nicht so signifikant auf das Endergebnis aus.

Tabelle 4-21 zeigt die daraus resultierende Bewertung der generischen Pfade im Bereich schwere Nutzfahrzeuge.

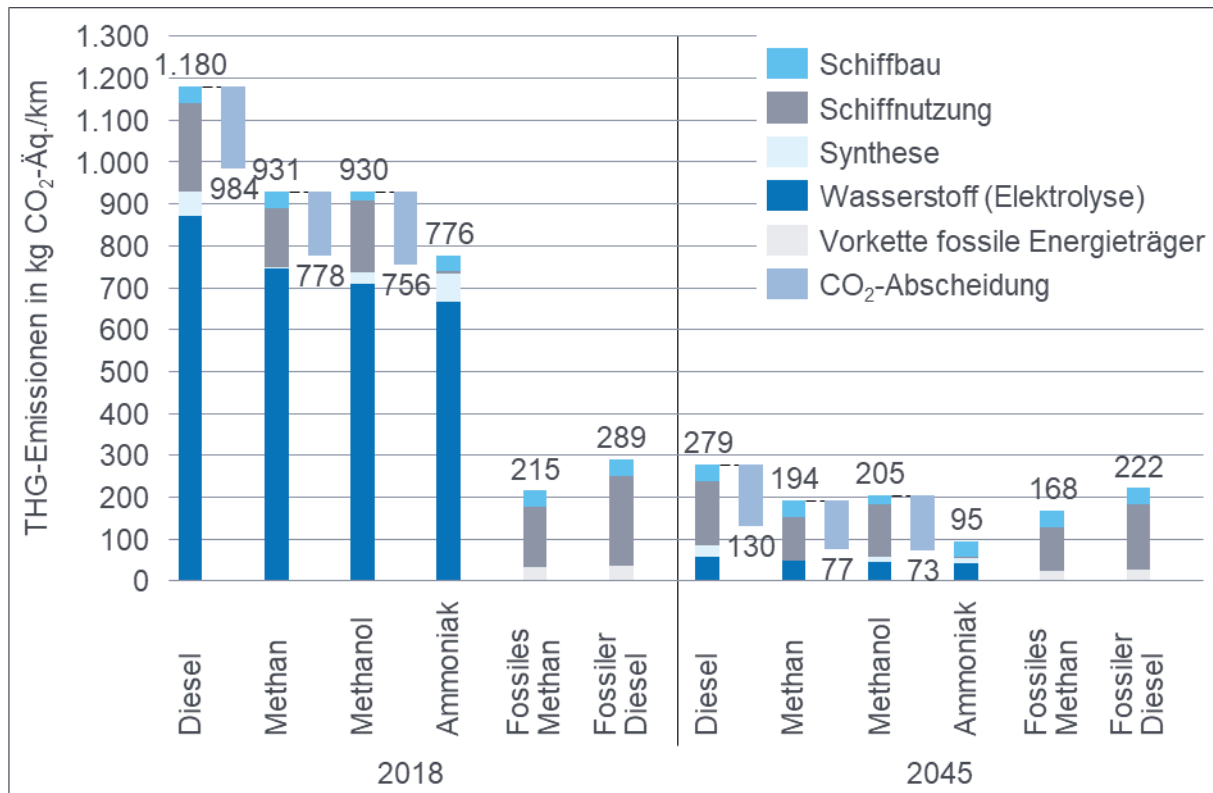


**Tabelle 4-21:** Ökologische Bewertung der generischen Kraftstoffe im Bereich schwere Nutzfahrzeuge

Kraftstoffpfad	Syn_Diesel_Snf	Syn_LNG_Snf	Syn_Methanol_Snf	Bio_HVO_Snf	Fossil_LNG_Snf	Fossil_Diesel_Snf
Kraftstoff	100 % FT-Diesel	100 % Methan	100 % Methanol	100 % HVO	100 % Erdgas	100 % fossiler Diesel
Treibhausgasemissionen 2018	-4	-2	-3	+3	+2	+2
Treibhausgasemissionen 2030	+3	+3	+3	+4	+3	+2
Treibhausgasemissionen 2045	+4	+4	+4	+4	+3	+3
Kumulierter Energieaufwand 2018	-3	-2	-2	+4	+1	+1
Kumulierter Energieaufwand 2030	+2	+2	+2	+4	+2	+2
Kumulierter Energieaufwand 2045	+4	+4	+4	+4	+2	+2
Ursprung des verwendeten CO <sub>2</sub>	0	0	0	n.a	n.a	n.a

### Bereich Schifffahrt

Im Schiffsbereich wird neben den kohlenstoffbasierten, synthetischen Kraftstoffen auch Ammoniak als generischer Pfad betrachtet. Die Ergebnisse für alle Kraftstoffe sind in Abbildung 4-9 dargestellt.



**Abbildung 4-9:** THG-Emissionen pro Kilometer über den gesamten Lebenszyklus, Bereich Schifffahrt

Die Ergebnisse zeigen in diesem Bereich ein ähnliches Bild. Inklusive CO<sub>2</sub>-Gutschrift liegen die synthetischen Kraftstoffe im Jahr 2045 unter den fossilen Referenzen. Auch hier zeigt sich, dass der auf Syncrude basierende Diesel höhere THG-Emissionen verursacht als Methan und Methanol. Ammoniak wird ausschließlich im Schiffsbereich betrachtet. Im Vergleich mit den anderen Kraftstoffen verursacht Ammoniak im Jahr 2018 Gesamtemissionen in einer ähnlichen Größenordnung wie Methan und Methanol. Im Jahr 2045 liegen die Emissionen von Ammoniak etwas über den Emissionen von Methan und Methanol.

Über den spezifischen Verbrauch von Ammoniak in Schiffsmotoren ist allerdings weitgehend wenig bekannt, er unterliegt somit hohen Unsicherheiten. Für die durchgeführte LCA wird ein um 2,3 höherer Verbrauch von Ammoniak im Vergleich zu Diesel angenommen. Dieser Faktor ergibt sich aus dem Unterschied der beiden Heizwerte (siehe 4.4). Eine genauere Bestimmung ist an dieser Stelle nicht möglich. Um dieser Unsicherheit Rechnung zu tragen, wird im Folgenden für das Jahr 2018 die Abhängigkeit der THG-Emissionen von der Effizienz des Motors nochmals dargelegt:

- Hohe Effizienz: Verbrauch von 120 kg/km; THG-Emissionen von 629 kg CO<sub>2</sub>-Äq/km
- Aktuelle Annahme: Verbrauch von 150 kg/km; THG-Emissionen von 776 kg CO<sub>2</sub>-Äq/km
- Niedrige Effizienz: Verbrauch von 270 kg/km; THG-Emissionen von 1364 kg CO<sub>2</sub>-Äq/km

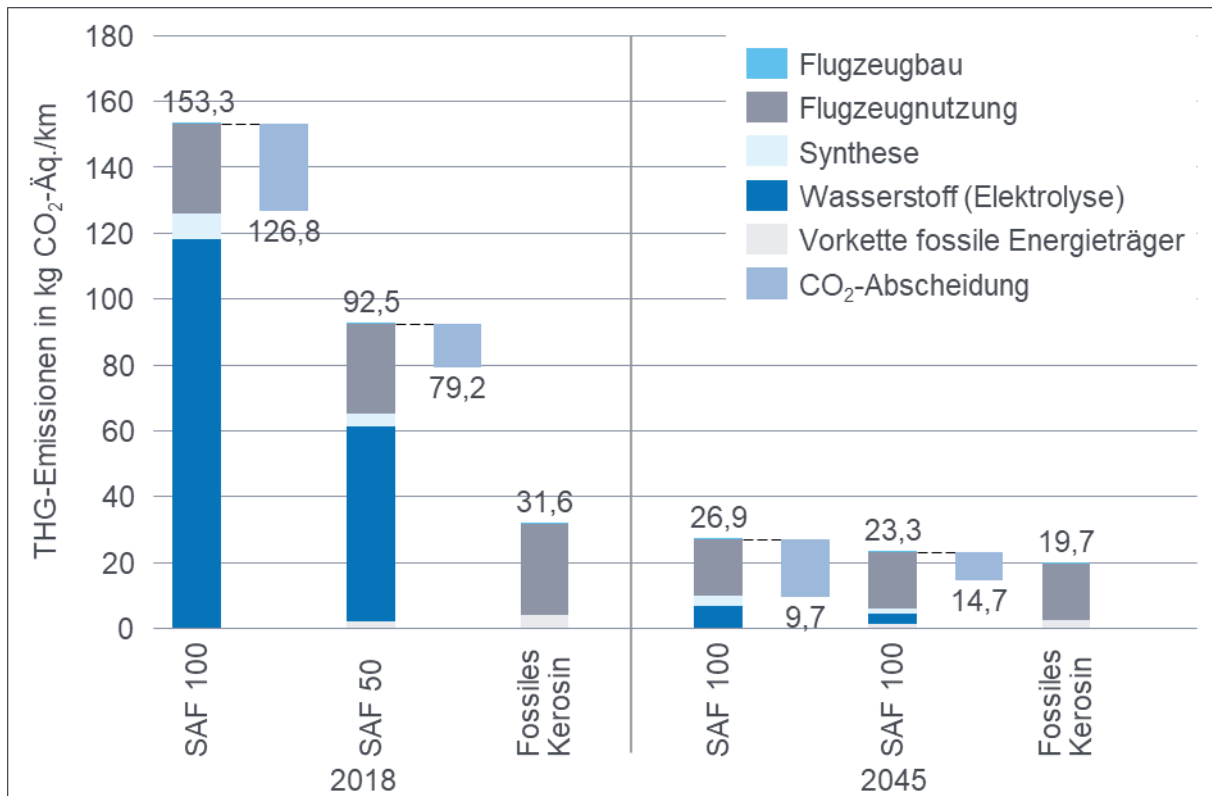
Die sich in der Folge der Analysen für den Schiffsverkehr ergebenden Bewertungen sind in Tabelle 4-22 dargestellt.

**Tabelle 4-22:** Ökologische Bewertung der generischen Kraftstoffe im Bereich Schifffahrt

Kraftstoffpfad	Syn_Ammoniak_Schiff	Syn_Diesel_Schiff	Syn_LNG_Schiff	Syn_Methanol_Schiff	Fossil_LNG_Schiff	Fossil_Diesel_Schiff
Kraftstoff	100 % Ammoniak	100 % FT-Diesel	100 % Methan	100 % Methanol	100 % Erdgas	100 % fossiler Schiffsdiesel
Treibhausgasemissionen 2018	-2	-3	-2	-1	+3	+2
Treibhausgasemissionen 2030	+3	+2	+3	+3	+3	+2
Treibhausgasemissionen 2045	+4	+3	+4	+4	+3	+3
Kumulierter Energieaufwand 2018	+1	0	+1	+1	+3	+3
Kumulierter Energieaufwand 2030	+3	+3	+3	+3	+3	+3
Kumulierter Energieaufwand 2045	+4	+4	+4	+4	+3	+3
Ursprung des verwendeten CO <sub>2</sub>	n.a.	0	0	0	n.a.	n.a.

**Bereich Luftfahrt**

Im Bereich Luftfahrt wird der Kraftstoff Kerosin als reiner synthetischer Kraftstoff, als Blend (Drop-In 50: 50 % synthetisches und 50 % fossiles Kerosin) und fossiles Kerosin betrachtet. Die Ergebnisse sind in Abbildung 4-10 dargestellt.



**Abbildung 4-10:** THG-Emissionen pro Kilometer über den gesamten Lebenszyklus, Bereich Luftfahrt; SAF 50 = 50 %Vol. SAF + 50 %Vol. fossiles Kerosin; SAF 100: 100 % SAF

Aus heutiger Sicht erweist sich das fossile Kerosin als Option mit den geringsten THG-Emissionen, gefolgt vom Drop-In-Kraftstoff und dem synthetischen Kerosin. 2045 dreht sich diese Reihenfolge um.

Aus den Ökobilanzergebnissen ergeben sich folgende Bewertungen in der Bewertungsmatrix für die generischen Pfade im Bereich Luftfahrt.

**Tabelle 4-23:** Ökologische Bewertung der generischen Kraftstoffe im Bereich Luftfahrt

Kraftstoffpfad	Syn_SAF50_Luft	Syn_SAF100_Luft	Fossil_Kerosin_Luft
Kraftstoff	50 % <sub>vol</sub> SAF + 50 % <sub>vol</sub> fossiles Kerosin	100 % SAF	100 % fossiles Kerosin
Treibhausgasemissionen 2018	-1	-4	+2
Treibhausgasemissionen 2030	+3	+2	+3
Treibhausgasemissionen 2045	+3	+4	+3
Kumulierter Energieaufwand 2018	-1	-4	+2
Kumulierter Energieaufwand 2030	+2	+2	+2
Kumulierter Energieaufwand 2045	+3	+4	+3
Ursprung des verwendeten CO <sub>2</sub>	0	0	k.A.

**Bereich Rückverstromung**

Für den Bereich Rückverstromung sind die resultierenden Bewertungen ohne Beitragsanalyse in Tabelle 4-24 dargestellt. Auch hier zeigt sich, dass biobasierte Kraftstoffe aus Sicht der gesamten THG-Emissionen und des kumulierten Energieaufwands am besten abschneiden. Synthetisches Methan schneidet 2018 vergleichsweise schlecht ab, verbessert sich allerdings relativ zu den anderen Kraftstoffen bis zum Jahr 2045.

**Tabelle 4-24:** Ökologische Bewertung der generischen Kraftstoffe im Bereich Rückverstromung

Kraftstoffpfad	Syn_CNG_Strom	Bio_CNG_Strom	Fossil_CNG_Strom
Kraftstoff	100 % Methan	100 % Biogas	100 % Erdgas
Treibhausgasemissionen 2018	-4	+4	+3
Treibhausgasemissionen 2030	+3	+4	+3
Treibhausgasemissionen 2045	+4	+4	+3
Kumulierter Energieaufwand 2018	-4	+4	+1
Kumulierter Energieaufwand 2030	+1	+4	+1
Kumulierter Energieaufwand 2045	+3	+4	+1
Ursprung des verwendeten CO <sub>2</sub>	0	k.A.	k.A.

### Sensitivitätsanalyse

Für die Sensitivitätsanalyse wurden verschiedene Pfadkombinationen variiert. Dadurch kann die Robustheit der Ergebnisse hinsichtlich verschiedener Parameter untersucht werden. Die berücksichtigten Variationen sind in folgender Tabelle dargestellt:

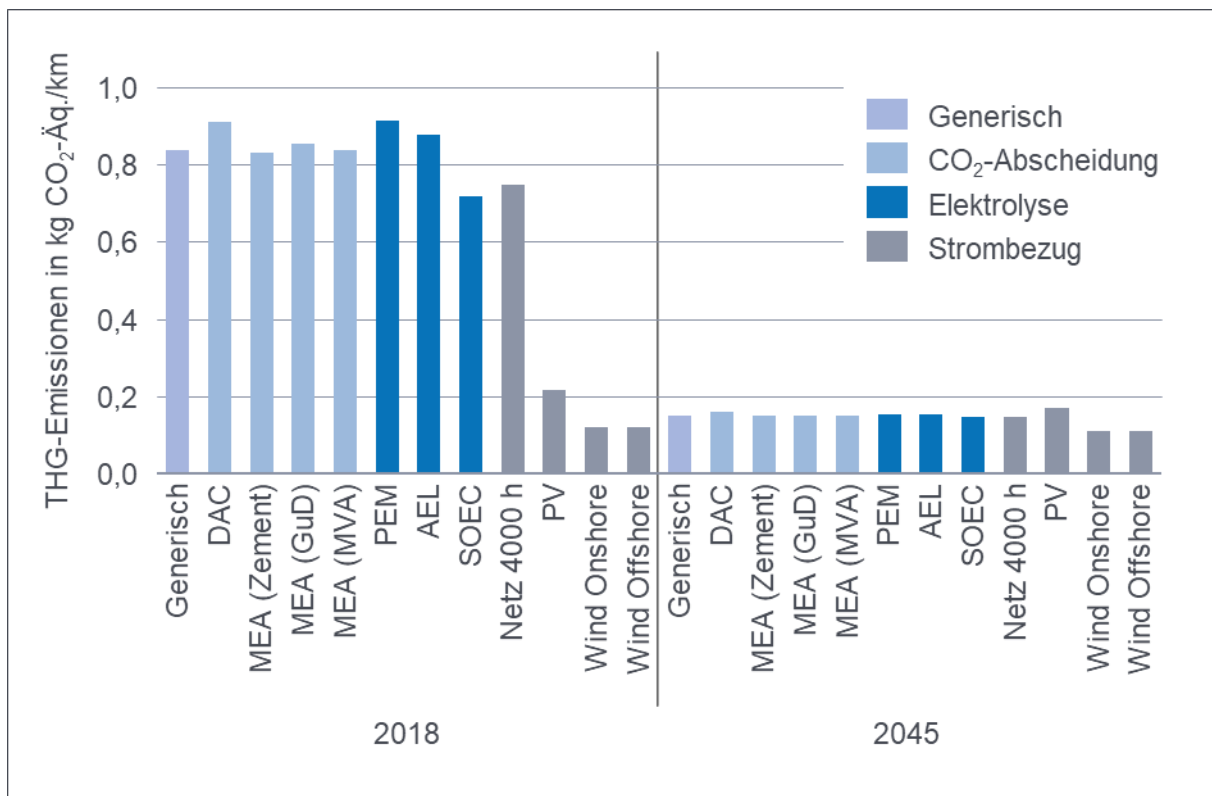
**Tabelle 4-25:** Übersicht über Variationen der einzelnen Elemente der Pfade

Jahr	C-Quelle	H-Quelle	Stromquelle
2018	generisch	generisch	Netz 8.000 h (= generisch)
2030	Direkt Air Capture (DAC)	Proton-Austausch-Membran (PEM)	Netz 4.000 h
2045	Rauchgaswäsche mit Monoethanolamin (MEA) (Zement)	Alkalische Elektrolyse (AEL)	Photovoltaik (PV)
	MEA (GuD)	Hochtemperatur-Elektrolyse (SOEC)	Wind Onshore
	MEA (MVA)		Wind Offshore

In jeder Kombination wird ein anderes Element variiert, der restliche Pfad bleibt wie im generischen Fall. Daraus ergeben sich 78 Kombinationen. Die Kombinationen werden immer nach dem Parameter benannt, der vom generischen Fall abweicht. Dies ergeben beispielsweise diese Kombinationen:

- „**Generisch**“: Deutschland - 2018 - generisch - generisch - Netz 8.000 h - GS
- „**DAC**“: Deutschland - 2018 - **DAC** - generisch - Netz 8.000 h - GS
- „**Wind Offshore**“: Deutschland - 2018 - generisch - generisch - **Wind Offshore** - GS

Für die Sensitivitätsanalyse sind die Variationen für den Kraftstoff Benzin für die Nutzung im Pkw und die Jahre 2018 und 2045 dargestellt.



**Abbildung 4-11:** THG-Emissionen Sensitivitätsanalyse für synthetisches Benzin im Pkw

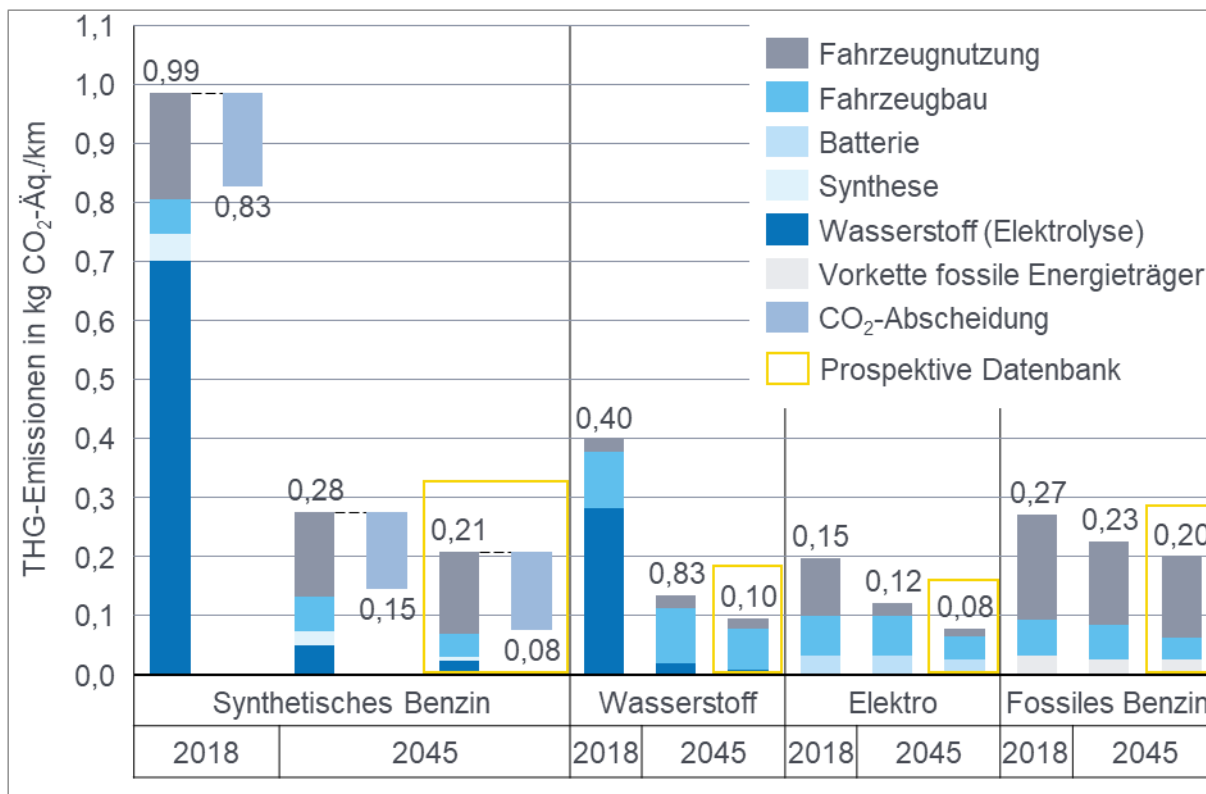
Die Gesamtemissionen werden im Jahr 2018 maßgeblich durch die Wahl der Stromquelle beeinflusst. Die Variation der Elektrolyse oder der CO<sub>2</sub>-Abscheidungstechnologie hingegen hat eine geringere Auswirkung auf die Gesamtemissionen. Da im Jahr 2045 von einem dekarbonisierten Energiesystem ausgegangen wird, beeinflusst die Wahl der Stromquelle die Gesamtemissionen im Vergleich zu 2018 weniger. Auch die Wahl der C- bzw. H-Quelle hat einen geringeren absoluten Einfluss auf die Gesamtemissionen.

### **Berücksichtigung von zukünftigen Entwicklungen**

In LCAs können Anpassungen, welche zukünftige Entwicklungen berücksichtigen, auf zwei Ebenen vorgenommen werden. Zum einen kann das Vordergrundsystem angepasst werden. Das beinhaltet alle in Abbildung 2-2 dargestellten Prozesse, wie den Strommix, die Bereitstellung von CO<sub>2</sub> und H<sub>2</sub>, die Synthese und die Nutzung des Kraftstoffes im Fahrzeug. Hier können zukünftige Entwicklungen, wie z. B. die Zusammensetzung des Strommixes oder Effizienzsteigerungen der modellierten Technologien, berücksichtigt werden. Alle Daten, für die keine expliziten Energie- und Stoffströme für die LCA erhoben werden, sind als Hintergrundsystem zu bezeichnen. Sie stammen aus LCA-Datenbanken. Im Projekt wird die Datenbank ecoinvent verwendet, um die Emissionen, die z. B. einzelne Energiebereitstellungstechnologien verursachen oder die durch die Herstellung des Fahrzeugs verursacht werden, zu berücksichtigen. Dieses Hintergrundsystem besteht aus einer Vielzahl an Prozessen. Über das Tool premise [Sacchi et al. 2022] können sie an zukünftige Szenarien angepasst werden. Diese Szenarien basieren auf einem „Integrated Assessment Model“, das Zusammenhänge zwischen Ökonomie, Land, Energie und Klima für globale Entwicklungen darstellt.



Um die Auswirkung durch die Anpassung der Hintergrunddatenbank auf die Ergebnisse der LCA zu zeigen, werden im Folgenden einige generische Pfade mit einer solchen prospektiven Datenbank verknüpft und die Ergebnisse neu berechnet. Außerdem sollen die Ergebnisse in einen weiteren Kontext eingeordnet werden. Deshalb wird der synthetische Kraftstoff nicht nur mit der fossilen Referenz, sondern auch mit einem Elektroauto und einem Brennstoffzellen-Fahrzeug verglichen. Die Ergebnisse sind in Abbildung 4-12 dargestellt.



**Abbildung 4-12:** Einordnung der Ergebnisse für synthetisches Benzin im Pkw. Anpassung der prospektiven Hintergrunddatenbank und Vergleich mit einem Elektroauto, fossilem Benzin und einem Brennstoffzellen-Fahrzeug

Die Abbildung zeigt, dass durch die Anpassung der Hintergrunddatenbank die Emissionen des synthetischen Benzins im Jahr 2045 von 0,28 kg CO<sub>2</sub>-Äq./km auf 0,21 kg CO<sub>2</sub>-Äq./km sinken. Werden die negativen Emissionen aus der Abscheidung des CO<sub>2</sub> berücksichtigt, so halbieren sich die Emissionen von synthetischem Benzin beinahe (von 0,15 auf 0,08 kg CO<sub>2</sub>-Äq./km). Der Vergleich der Technologien zeigt, dass die Anrechnung der negativen Emissionen aus der Abscheidung wichtig für die Bewertung des synthetischen Kraftstoffes ist. Werden die Emissionen nicht gutgeschrieben, so schneidet das synthetische Benzin hinsichtlich der THG-Emissionen schlechter ab als alle anderen Technologien. Werden die Emissionen dem Kraftstoff gut geschrieben so liegen sie im Jahr 2045 ohne Hintergrundanpassung unter den Emissionen des fossilen Benzins und mit Hintergrundanpassungen unter den THG-Emissionen des Brennstoffzellenfahrzeugs und gleichauf mit dem Elektroauto.

### **Fazit**

Die Bewertung der THG-Emissionen zeigt, dass selbst im Jahr 2045 unter Berücksichtigung des gesamten Lebenszyklus keine komplett klimaneutralen Kraftstoffe verfügbar sein werden. Im Jahr 2018 schneiden alle untersuchten synthetischen Kraftstoffe in allen Transportbereichen schlechter ab als die fossilen und biobasierten Referenzen. Grund dafür ist der Strommix (Deutschland 2018), der die THG-Emissionen der Elektrolyse und der CO<sub>2</sub>-Abscheidung maßgeblich beeinflusst. Im Vergleich der einzelnen Kraftstoffe weisen die Kraftstoffe Methan und Methanol in den Bereichen Pkw, schwere Nutzfahrzeuge und Schifffahrt jeweils die geringsten Emissionen auf. Diesel und Benzin, für welche die FT-Synthese notwendig ist, verursachen in den drei Anwendungsbereichen höhere Emissionen als synthetisches Methan und Methanol.

Die Herstellungsrouten des Kraftstoffes ist aber nicht der größte Stellhebel, um die Gesamtemissionen zu beeinflussen. Die ökologischen Bewertungen der THG-Emissionen über den gesamten Lebensweg und die Sensitivitätsanalysen zeigen, dass vor allem die Emissionen des Strommixes relevant für die Klimabilanz sind.

Die Bewertung in der Bewertungsmatrix legt zu Grunde, dass das abgeschiedene CO<sub>2</sub>, unabhängig von der Quelle, vollständig dem Kraftstoff zugeschrieben wird. Deshalb ist eine separate Berücksichtigung des Bewertungskriteriums CO<sub>2</sub>-Quelle, sowie die Darstellung der Ergebnisse als Balkendiagramme essenziell. Denn vor allem bei fossilen CO<sub>2</sub>-Quellen gibt es Argumente, um das abgeschiedene CO<sub>2</sub> nicht dem Kraftstoff, sondern der CO<sub>2</sub>-Quelle gutzuschreiben. In diesem Fall fällt das Ergebnis der THG-Bilanz entsprechend höher aus.

An dieser Stelle sei zudem nochmals darauf hingewiesen, dass der Fokus der hier erstellten Analysen bei langlebigen Treibhausgasen liegt, kurzlebige Emissionskomponenten jedoch vernachlässigt wurden (vgl. Kapitel 0). Diese fließen in qualitativer Form über die Bewertungen der Kraftstoffnutzung ein (vgl. Kapitel 4.3). In zukünftigen Forschungsvorhaben sollte eine quantitative Bewertung der Wirkungen auch der Emissionen kurzlebiger Komponenten, sowohl bei der Kraftstoffnutzung als auch in der Vorkette, angestrebt werden und dabei sowohl Aspekte der Klimawirkungen als auch der Luftqualität betrachtet werden. Dabei sollten auch die Wirkungen sekundärer Schadstoffe berücksichtigt werden, die als Folgeprodukte der primären Emissionen in der Atmosphäre gebildet werden (z.B. Ozon oder sekundäre organische Partikel). Die Bildungsprozesse dieser Substanzen sind häufig stark nichtlinear und können daher durch die Ansätze dieser Studie nicht vollständig abgebildet werden.

## 4.6 Akzeptanz

### Bereich Pkw

**Tabelle 4-26:** Bewertungsübersicht Akzeptanz: Bereich Pkw

Kraftstoffpfad	GEN_Benzin_#1	GEN_Hythan_#1	GEN_Methan_#1	GEN_Methanol_#1	MKS_B_CH4_#1	MKS_G_CH4_#1	MKS_Ö_Benzin_#1
Kraftstoff	Benzin	HCNG	Methan (CNG)	Methanol	Methan	Methan	Benzin
<b>Kosten / Nutzen</b>	0	+2	+1	+1	+3	k.A.	+4
<b>Umweltwirkungen</b>	0	+1	+1	+1	+3	+2	+1
<b>Anwendungstauglichkeit</b>	+2	-1	0	-1	+1	+1	+3

Von allen betrachteten Alternativen zum fossilen Benzin besitzt Biogas (Bio\_CNG\_Pkw) das beste Bewertungsprofil, wenn man die drei Kriterien (Kosten / Nutzen, Umweltwirkungen, Anwendungstauglichkeit) zusammengefasst betrachtet. Bei Kosten / Nutzen und bei Umweltwirkungen erreicht es jeweils den alleinigen Bestwert (jeweils +3). Der Kostenfaktor hat sich in Akzeptanzerhebungen als entscheidendes Kriterium bei der Kraftstoffwahl erwiesen. Umweltfaktoren sind für Privatnutzende wichtiger als für Logistikunternehmen und Pkw-Flottenbetreiber. Bezüglich der Anwendungstauglichkeit bleibt Biogas, ebenso wie die übrigen Pfade, mit einer nur durchschnittlichen Bewertung (+1) hinter dem fossilen Benzin und dessen synthetischem Analogon (Syn\_Benzin\_Pkw) zurück, die hier bessere Werte aufweisen (+3 bzw. +2). Entscheidender Ansatzpunkt für eine erfolgreiche und akzeptanzbegleitete Verbreitung von Biogas (oder anderer aussichtsreicher synthetischer Kraftstoffe) im Pkw-Verkehr scheinen demzufolge Entwicklungen zur Verbesserung der Anwendungstauglichkeit zu sein. Relevant sind hierbei etwa die Aspekte Drop-In-Fähigkeit des Kraftstoffs und seine breite Verfügbarkeit an Tankstellen. Die Ermöglichung hoher Reichweiten ist ein weiterer wichtiger Punkt, insbesondere für Pkw-Flottenbetreiber.

**Bereiche leichte und schwere Nutzfahrzeuge (LNF, SNF)****Tabelle 4-27:** Bewertungsübersicht Akzeptanz: Bereiche LNF und SNF

Kraftstoffpfad	GEN_Diesel_#1	GEN_DME_#1 (Lnf)	GEN_LNG_#2	GEN_Methanol_#2	MKS_B_HVO_#1	MKS_G_CH4_#2	MKS_Ö_Diesel_#1
Kraftstoff	Diesel	DME	Methan (LNG)	Methanol	Diesel	Methan	Diesel
<b>Kosten / Nutzen</b>	0	+1	+1	+1	k.A.	+4	+4
<b>Umweltwirkungen</b>	+1	+3	+1	+1	+3	+2	+1
<b>Anwendungstauglichkeit</b>	+2	-1	+1	-2	+2	+2	+3

Bei den schweren Nutzfahrzeugen (SNF) weist keiner der nicht-fossilen Kraftstoffe ein vergleichbar gutes Bewertungsprofil wie Erdgas oder fossiler Diesel auf. Der biogene HVO-Kraftstoff (Bio\_HVO\_SNF) erzielt die beste Umweltbewertung (+3) und eine gute Bewertung im Anwendungs-Kriterium (+2). Dieselbe Bewertung im Anwendungs-Kriterium erreicht FT-Diesel, der jedoch im Kosten / Nutzen-Kriterium zu keiner positiven Bewertung kommt. Methanol (Syn\_Methanol\_SNF) kann vor allem hinsichtlich der Anwendungstauglichkeit nicht überzeugen (-2); auch DME (für LNF) hat hier einen Schwachpunkt (-1). Methan (Syn\_LNG\_SNF) weist das ausgeglichene Bewertungsprofil auf, mit +1 in allen drei Kriterien. Methan scheint damit am ehesten ein synthetischer Kraftstoff zu sein, der den im SNF-Bereich besonders wichtigen (akzeptanzrelevanten) Faktor günstiges Kosten / Nutzen-Verhältnis (Gesamtbetriebskosten sind der wesentliche Entscheidungsfaktor bei der Antriebs- / Kraftstoffwahl) mit den erforderlichen positiven Umweltwirkungen verbindet. Letztere spielen zwar bisher oft eine untergeordnete Rolle für SNF-Betreiber, gewinnen aber an Bedeutung (z.B. wenn Auftraggeber Wert auf klimaneutralen Transport legen). Beim wichtigen Kriterium der Anwendungstauglichkeit spielen mehrere Aspekte eine Rolle. Die Möglichkeit der fortgesetzten Nutzung von Bestandsfahrzeugen mit neuen Kraftstoffen ist zwar laut Akzeptanzerhebungen weniger relevant, da die SNF meist für eine vergleichsweise kurze Zeit in der Flotte sind. Allerdings spielen die Umrüstkosten, falls erforderlich, sowie der Einführungszeitpunkt eine entscheidende Rolle, da alternative Kraftstoffe hier in starker Konkurrenz zu anderen Antriebstechnologien stehen. Da diese Fahrzeuge auch international unterwegs sind, sollten alternative Kraftstoffe flächendeckend verfügbar sein, auch im Ausland. Auch die Reichweite hat für diese Nutzergruppe eine hohe Bedeutung (Fahrzeuge weisen eine hohe Fahrleistung auf, zusätzliche Tankstops sind ein Effizienzverlust).

**Bereich Schifffahrt****Tabelle 4-28:** Bewertungsübersicht Akzeptanz: Bereich Schifffahrt

Kraftstoffpfad	GEN_Ammoniak_#1	GEN_Diesel_#3	GEN_LNG_#3	GEN_Methanol_#3	MKS_G_CH4_#3	MKS_Ö_Diesel_#2
Kraftstoff	Ammoniak	Diesel	Methan (LNG)	Methanol	Methan	Diesel
<b>Kosten / Nutzen</b>	0	0	+1	+1	+4	k.A.
<b>Umweltwirkungen</b>	+3	+1	+2	+2	+3	+2
<b>Anwendungstauglichkeit</b>	-2	+2	+1	0	+2	+3

Als nicht-fossiler Kraftstoffpfad, der bei globaler Betrachtung über alle drei Kriterien hinweg die besten Bewertungen aufweist (und dem guten Bewertungsprofil von Erdgas, Fossil\_LNG\_Schiff am nächsten kommt), erweist sich synthetisches Methan (Syn\_LNG\_Schiff). Dessen Bewertungen (Kosten / Nutzen +1, Umwelt +2, Anwendung +1) entsprechen fast jenen von synthetischem Methanol (GEN\_Methanol\_#3), welches im Anwendungskriterium etwas schlechter abschneidet (0). Eine bessere Anwendungstauglichkeit weist synthetischer Dieselmethan auf (Syn\_Diesel\_Schiff), der aber bei Kosten / Nutzen und Umweltwirkungen nicht punkten kann (0 bzw. +1). Für den Schiffs-Bereich lässt sich somit festhalten, dass sich noch kein nicht-fossiler Kraftstoff abzeichnet, der in allen Bereichen schon die Voraussetzungen für eine positive Akzeptanzbewertung erfüllt. Auch Ammoniak kann trotz guter Umwelt-Bewertung (+3) insgesamt nicht überzeugen, vor allem wegen der schlechten Anwendungstauglichkeit (-2). Es kann zudem angenommen werden, dass Ammoniak zumindest im Bereich der Passagierschifffahrt auf geringe Akzeptanz treffen dürfte (wegen Bedenken hinsichtlich Risikopotenzial und Geruchsbelastungen).

**Bereich Luftfahrt****Tabelle 4-29:** Bewertungsübersicht Akzeptanz: Bereich Luftfahrt

Kraftstoffpfad	GEN_Kerosin_#1	GEN_Kerosin_#2	MKS_Ö_Kerosin_#1
Kraftstoff	Kerosin	Kerosin	Kerosin
Kosten / Nutzen	+1	0	+4
Umweltwirkungen	+1	0	+2
Anwendungstauglichkeit	+3	+1	+3

Für das Anwendungsfeld Luftfahrt wurden, neben fossilem Kerosin, nur zwei generische Pfade betrachtet, nämlich synthetisches Kerosin in Reinform (Syn\_SAF100\_Luft) und als 50 %-Blend (Syn\_SAF50\_Luft). Der fossile Referenzkraftstoff (Fossil\_Kerosin\_Luft) hebt sich beim Kosten / Nutzen-Kriterium deutlich positiv von den (teil-)synthetischen Pfaden ab (+4 gegen 0 bzw. +1). Auch seine Bewertung bei den Umweltwirkungen (+2) wird von den FT-Kerosinpfaden nicht erreicht oder gar übertroffen. Bei der Anwendungstauglichkeit schneidet das reine synthetische Kerosin etwas schlechter ab als der Blendkraftstoff und das fossile Kerosin (+1 gegenüber +3). Nach den hier vorgestellten Resultaten deutet alles auf eine Verringerung des Kostennachteils als entscheidenden Ansatzpunkt zur Schaffung besserer Akzeptanzbedingungen für synthetisches Kerosin hin.

**Bereich Rückverstromung****Tabelle 4-30:** Bewertungsübersicht Akzeptanz: Bereich Rückverstromung

Kraftstoffpfad	GEN_Methan_#4	MKS_B_CH4_#2	MKS_G_CH4_#4
Kraftstoff	Methan	Methan	Methan
Kosten / Nutzen	+1	+3	k.A.
Umweltwirkungen	+1	+3	+2
Anwendungstauglichkeit	+1	+2	+2

Bei den Rückverstromungs-Pfaden weist Biogas (Bio\_CNG\_Strom) das beste Bewertungsprofil mit (sehr) guten Werten auf, besonders in den Kriterien Kosten / Nutzen und Umweltwirkungen (jeweils +3). Synthetisches Methan (Syn\_CNG\_Strom) weist zwar ebenfalls durchgehend positive Werte in den drei Kriterien auf, jedoch nicht in der Ausprägung wie Biogas.

## 4.7 Markteinführung

In diesem Kapitel soll für die generischen Pfade beurteilt werden, inwieweit Markteinführungsmechanismen (= MEM) sinnvoll wären und ob MEM aus Angebots- und / oder Nachfragesicht zwingend notwendig wären, oder ob darauf verzichtet werden könnte. Die fossilen und biobasierten Kraftstoffe werden in dieser Analyse nicht berücksichtigt, da an dieser Stelle keine MEM für bestehende Kraftstoffe untersucht bzw. erarbeitet werden sollen.

**Bereich Pkw:****Tabelle 4-31** Bewertungsübersicht Markteinführung: Bereich Pkw

Kraftstoffpfad			Syn_Benzin_Pkw	Syn_Hythan_Pkw	Syn_CNG_Pkw	Syn_Methanol_Pkw
Kraftstoff			100 % FT-Benzin	30 %Vol Wasserstoff + 70 %Vol Methan	100 % Methan	100 % Methanol
1) Wie sinnvoll sind MEM aus ökologisch-systemischer Sicht?	1.1) Sinnhaftigkeit von MEM aus systemischer Sicht	Wie weit ist die alternative Technologie in unterschiedlichen Bereichen durchschnittlich entwickelt (gemessen in Technology Readiness Level (TRL))?	-4	-4	-4	-4
		Wie gut kann die alternative Technologie die Mobilitäts- und Transportbedürfnisse erfüllen?	-4	-4	-4	-4
		Gesamt 1.1	-4	-4	-4	-4
	1.2) Sinnhaftigkeit eines MEM zum Schutz der Ressourcen	Wirkungsgrad der Herstellung	0	0	0	0
		C-Ausnutzungsgrad (Zielfuel)	-1	+4	+4	+4
		C-Ausnutzungsgrad (Summe der Elemente)	+3	+3	+3	+3
		Flächenverbrauch	-4	-3	-3	-3
		Gesamt 1.2	-1	+1	+1	+1
	<b>Gesamt 1</b>		<b>-3</b>	<b>-2</b>	<b>-2</b>	<b>-2</b>



Kraftstoffpfad			Syn_Benzin_Pkw	Syn_Hythan_Pkw	Syn_CNG_Pkw	Syn_Methanol_Pkw
Kraftstoff			100 % FT-Benzin	30 %Vol Wasserstoff + 70 %Vol Methan	100 % Methan	100 % Methanol
2) Kann aus nachfrage- seitiger Sicht auf MEM verzichtet werden?	2.1) Bezahlbarkeit	Veränderung der Ausgaben der privaten Haushalte gemessen an den Konsumausgaben	-4	-4	-4	-4
		Veränderung der Produktionskosten	-1	-1	-1	-1
		<b>Gesamt 2</b>	<b>-3</b>	<b>-3</b>	<b>-3</b>	<b>-3</b>
3) Kann aus angebotsseitiger Sicht auf MEM verzichtet werden?	3.1) Upstream	Wie kompatibel ist der Kraftstoffpfad mit bestehender Infrastruktur zur Herstellung synthetischer Kraftstoffe?	+1	-1	-1	+1
		Wie groß ist der Bedarf an Koppelprodukten der Herstellung?	+4	-4	-4	-4
		<b>Gesamt 3.1</b>	<b>+2</b>	<b>-2</b>	<b>-2</b>	<b>0</b>
	3.2) Midstream	Wie kompatibel ist der Kraftstoffpfad mit bestehender Infrastruktur zum Transport und der Betankung?	+4	-4	-1	-2
	3.3) Downstream	Wie kompatibel ist der Kraftstoffpfad mit der bestehenden Fahrzeugflotte?	+4	-4	-2	0
		Wie kompatibel ist der Kraftstoff mit bestehenden Normen / Regularien?	+4	0	+4	-3
		<b>Gesamt 3.3</b>	<b>+4</b>	<b>-2</b>	<b>+1</b>	<b>-2</b>
	<b>Gesamt 3</b>		<b>+3</b>	<b>-3</b>	<b>-1</b>	<b>-1</b>

### 1) Wie sinnvoll sind MEM aus ökologisch-systemischer Sicht?

Im Bereich Pkw bestehen bereits, wie in Kapitel 3.7 in Tabelle 3-17 beschrieben, voll entwickelte Alternativen mit batterieelektrischen Fahrzeugen. Deshalb besteht in diesem Bereich nicht die Notwendigkeit, knappe alternative Kraftstoffe einzuführen. Beim zweiten Indikator, der Ressourceneffizienz der Kraftstoffe, schneidet synthetisches Benzin im Vergleich mit Hythan, Methan und Methanol schlechter ab. Hier ist vor allem die schlechtere C-Ausnutzung im Zielfuel zu nennen. Deshalb wären für Hythan, Methan und Methanol, bezogen auf den Ressourcenverbrauch in der Herstellung, MEM tendenziell eher zu empfehlen. Aufgrund der insgesamt guten Alternativen im Pkw-Bereich besteht aus ökologisch-systemischer Sicht für keinen der hier untersuchten Kraftstoffe die Notwendigkeit zu ihrer Einführung.

### 2) Wie notwendig sind MEM aus nachfrageseitiger Sichtweise?

Eine Belastung für die Verbrauchenden und die Produktion ist bei allen generischen Kraftstoffpfaden vorhanden. Es gibt keine Unterschiede zwischen den Kraftstoffpfaden. Erwartungsgemäß werden die Verbrauchenden stärker belastet als die Produktion, was nachfrageseitig für MEM sprechen würde.

### 3) Kann aus angebotsseitiger Sicht auf MEM verzichtet werden?

Wird der Blickwinkel geändert und die Notwendigkeit für Markteinführungsmechanismen aus Angebotssicht betrachtet, so fällt auf, dass Benzin in allen Bereichen von Upstream über Midstream bis zum Downstreambereich aufgrund der hohen Kompatibilität gut abschneidet und keiner MEM in diesen Bereichen bedürfte. Am schlechtesten schneidet Hythan ab, welches besonders im Midstream und Downstreambereich kaum kompatibel ist. Neben Hythan wären auch für alle weiteren Pfade, außer Benzin, MEM notwendig.

### Fazit

Es ist an dieser Stelle festzuhalten, dass eine Notwendigkeit für die Markteinführung für keinen der Kraftstoffe bestehen würde, da der Pkw-Bereich bereits mit guten Alternativen abgedeckt werden könnte. Deshalb müsste auch der Bedarf an MEM im Nachfragebereich für die hier aufgeführten synthetischen Kraftstoffe nicht abgedeckt werden.

**Bereich Leichte Nutzfahrzeuge**

Aufgrund der Verwendung als mögliches Substitut für Diesel werden hier nur die betreffenden zwei generischen Pfade betrachtet.

**Tabelle 4-32** Bewertungsübersicht Markteinführung: Bereich leichte Nutzfahrzeuge

Kraftstoffpfad			Syn_Diesel_L/SNF	Syn_DME_LNF
			100 % FT-Diesel	100 % DME
Kraftstoff			100 % FT-Diesel	100 % DME
1) Wie sinnvoll sind MEM aus ökologisch-systemischer Sicht?	1.1) Sinnhaftigkeit von MEM aus systemischer Sicht	Wie weit ist die alternative Technologie in unterschiedlichen Bereichen durchschnittlich entwickelt (gemessen in Technology Readiness Level (TRL))?	-4	-4
		Wie gut kann die alternative Technologie die Mobilitäts- und Transportbedürfnisse erfüllen?	-4	-4
		Gesamt 1.1	-4	-4
	1.2) Sinnhaftigkeit MEM zum Schutz der Ressourcen	Wirkungsgrad der Herstellung	0	0
		C-Ausnutzungsgrad (Zielfuel)	-1	+4
		C-Ausnutzungsgrad (Summe der Elemente)	+3	+3
		Flächenverbrauch	-4	-3
		Gesamt 1.2	-1	+1
	<b>Gesamt 1</b>		<b>-3</b>	<b>-2</b>

Kraftstoffpfad			Syn_Diesel_L/SNF	Syn_DME_LNF
Kraftstoff			100 % FT-Diesel	100 % DME
2) Kann aus nachfrageseitiger Sicht auf MEM verzichtet werden?	2.1) Bezahlbarkeit	Veränderung der Ausgaben der privaten Haushalte gemessen an den Konsumausgaben	-1	-1
		Veränderung der Produktionskosten	-1	-1
		<b>Gesamt 2</b>	<b>-1</b>	<b>-1</b>
3) Kann aus angebotsseitiger Sicht auf MEM verzichtet werden?	3.1) Upstream	Wie kompatibel ist der Kraftstoffpfad mit bestehender Infrastruktur zur Herstellung synthetischer Kraftstoffe?	+1	0
		Wie groß ist der Bedarf an Koppelprodukten der Herstellung?	+4	-4
		<b>Gesamt 3.1</b>	<b>+2</b>	<b>-1</b>
	3.2) Midstream	Wie kompatibel ist der Kraftstoffpfad mit bestehender Infrastruktur zum Transport und der Betankung?	+4	-2
	3.3) Downstream	Wie kompatibel ist der Kraftstoffpfad mit der bestehenden Fahrzeugflotte?	+4	-4
		Wie kompatibel ist der Kraftstoff mit bestehenden Normen / Regularien?	+3	+1
		<b>Gesamt 3.3</b>	<b>+4</b>	<b>-2</b>
		<b>Gesamt 3</b>	<b>+3</b>	<b>-2</b>

### 1) Wie sinnvoll sind MEM aus ökologisch-systemischer Sicht?

Im Bereich leichte Nutzfahrzeuge werden Diesel und DME verglichen. Dieser Bereich kann, wie in Kapitel 3.7 in Tabelle 3-17 beschrieben, mit Alternativen vollständig abgedeckt werden. Da diese voll ausgereift sind, sind aus systemischer Sicht keine MEM sinnvoll. Im direkten Vergleich, bezogen auf die Ressourceneffizienz, schneidet DME leicht besser ab, besonders bei der C-Ausbeute, aber auch beim Flächenverbrauch. Deshalb wären für DME, bezogen auf den Ressourcenverbrauch in der Herstellung, MEM tendenziell gegenüber synthetischem Diesel zu bevorzugen. Insgesamt sind durch die geringe systemische Notwendigkeit aber für keinen Pfad aus ökologisch-systemischer Sichtweise MEM zu empfehlen.

### 2) Wie notwendig sind MEM aus nachfrageseitiger Sichtweise?

In Bezug auf die Nachfrage kann nicht auf MEM verzichtet werden: Alle Pfade haben eine Belastung der Verbrauchenden und der Produktion zur Folge, die in beiden Bereichen ähnlich hoch ausfällt.

### 3) Kann aus angebotsseitiger Sicht auf MEM verzichtet werden?

Bezogen auf die Infrastruktur ist Diesel mit deutlich weniger Aufwand bei der Umrüstung und dem Aufbau der Infrastruktur verbunden. Es ist größtenteils nur eine geringe Anpassung an der Infrastruktur notwendig. Zudem bestehen Koppelprodukte mit hohem Bedarf, sodass in allen Bereichen die Chance besteht, aus Angebotssicht auf MEM verzichten zu können. Für DME dagegen sind MEM über alle Bereiche von Upstream über Midstream bis Downstream notwendig.

### Fazit

Es ist an dieser Stelle festzuhalten, dass eine Notwendigkeit für die Markteinführung für keinen der Kraftstoffe bestehen würde, da der LNF-Bereich bereits mit guten Alternativen abgedeckt werden könnte. Deshalb müsste auch der Bedarf an MEM im Nachfragebereich für die hier aufgeführten synthetischen Kraftstoffe nicht abgedeckt werden.

**Bereich Schwere Nutzfahrzeuge**

Hier werden nur die für den Bereich schwere Nutzfahrzeuge geeigneten generischen Pfade verglichen.

**Tabelle 4-33** Bewertungsübersicht Markteinführung: Bereich schwere Nutzfahrzeuge

Kraftstoffpfad			Syn_Diesel_L/SNF	Syn_LNG_SNF	Syn_Methanol_SNF
Kraftstoff			100 % FT-Diesel	100 % Methan	100 % Methanol
1) Wie sinnvoll sind MEM aus ökologisch-systemischer Sicht?	1.1) Sinnhaftigkeit von MEM aus systemischer Sicht	Wie weit ist die alternative Technologie in unterschiedlichen Bereichen durchschnittlich entwickelt (gemessen in Technology Readiness Level (TRL))?	-2	-2	-2
		Wie gut kann die alternative Technologie die Mobilitäts- und Transportbedürfnisse erfüllen?	-4	-4	-4
		Gesamt 1.1	-3	-3	-3
	1.2) Sinnhaftigkeit eines MEM zum Schutz der Ressourcen	Wirkungsgrad der Herstellung	0	0	0
		C-Ausnutzungsgrad (Zielfuel)	-1	+4	+4
		C-Ausnutzungsgrad (Summe der Elemente)	+3	+3	+3
		Flächenverbrauch	-4	-3	-3
		Gesamt 1.2	-1	+1	+1
	<b>Gesamt 1</b>		<b>-2</b>	<b>-1</b>	<b>-1</b>

Kraftstoffpfad			Syn_Diesel_L/SNF	Syn_LNG_SNF	Syn_Methanol_SNF
Kraftstoff			100 % FT-Diesel	100 % Methan	100 % Methanol
2) Kann aus nachfrage-seitiger Sicht auf MEM verzichtet werden?	2.1) Bezahlbarkeit	Veränderung der Ausgaben der privaten Haushalte gemessen an den Konsumausgaben	-1	-1	-1
		Veränderung der Produktionskosten	-2	-2	-2
		<b>Gesamt 2</b>	<b>-2</b>	<b>-2</b>	<b>-2</b>
3) Kann aus angebotsseitiger Sicht auf MEM verzichtet werden?	3.1) Upstream	Wie kompatibel ist der Kraftstoffpfad mit bestehender Infrastruktur zur Herstellung synthetischer Kraftstoffe?	+1	-1	+1
		Wie groß ist der Bedarf an Koppelprodukten der Herstellung?	+4	-4	-4
		<b>Gesamt 3.1</b>	<b>+2</b>	<b>-2</b>	<b>0</b>
	3.2) Midstream	Wie kompatibel ist der Kraftstoffpfad mit bestehender Infrastruktur zum Transport und der Betankung?	+4	+1	-1
	3.3) Downstream	Wie kompatibel ist der Kraftstoffpfad mit der bestehenden Fahrzeugflotte?	+3	-2	-4
		Wie kompatibel ist der Kraftstoff mit bestehenden Normen / Regularien?	+3	+4	-3
		<b>Gesamt 3.3</b>	<b>+3</b>	<b>+1</b>	<b>-4</b>
	<b>Gesamt 3</b>		<b>+3</b>	<b>0</b>	<b>-2</b>

### 1) Wie sinnvoll sind MEM aus ökologisch-systemischer Sicht?

Im Bereich schwere Nutzfahrzeuge gibt es nach theoretischen Gesichtspunkten die Möglichkeit, alle Anwendungen mit Alternativen abzudecken, wie in Kapitel 3.7 in Tabelle 3-17 beschrieben ist. Der technische Reifegrad ist schon hoch. Der Bereich schwere Nutzfahrzeuge hat deshalb keine Priorität bei der Einführung von MEM für synthetische Kraftstoffe. Ein Vergleich der Ressourceneffizienz der verglichenen Kraftstoffe Diesel, Methan und Methanol ergibt deutlich bessere Werte für die C-Ausnutzung im Zielfuel bei Methan und Methanol. Deshalb wären, aus Sicht des Ressourcenverbrauchs in der Herstellung, diese beiden Kraftstoffe gegenüber synthetischem Diesel für MEM zu bevorzugen. Wegen der geringen Sinnhaftigkeit aus systemischer Sicht, sind MEM aus ökologisch-systemischer Sicht dennoch nicht zu empfehlen.

### 2) Wie notwendig sind MEM aus nachfrageseitiger Sichtweise?

Die Belastungen für Verbrauchende und die Produktion steigen für alle betrachteten Kraftstoffe an. Die Produktion wird dabei etwas stärker belastet als die Verbrauchenden. Es könnte aus Nachfragesicht deshalb nicht auf MEM verzichtet werden.

### 3) Kann aus angebotsseitiger Sicht auf MEM verzichtet werden?

Aus Angebotsicht könnte nur für den Dieselmkraftstoff auf MEM verzichtet werden, da er weitgehend mit der bestehenden Infrastruktur im Midstream und Downstreambereich kompatibel ist und im Upstreambereich durch Koppelprodukte mit hohem weltweiten Bedarf weitere Vermarktungsoptionen besitzt. Methan ist teilweise mit der bestehenden Infrastruktur kompatibel, bei Methanol sind größere Anpassungen notwendig und deshalb könnte auf MEM für diesen Kraftstoff nicht verzichtet werden.

### Fazit

Im SNF-Bereich bestehen bereits gute Alternativen, auch wenn diese zum Teil nicht vollständig ausgereift sind. Wahrscheinlich besteht aber auch in diesem Bereich nicht die Notwendigkeit für MEM. Sollte die weitere Entwicklung die Notwendigkeit für MEM wahrscheinlicher erscheinen lassen, so wären diese hauptsächlich durch die Nachfrageseite begründet.



**Bereich Schifffahrt:****Tabelle 4-34** Bewertungsübersicht Markteinführung: Bereich Schifffahrt

Kraftstoffpfad			Syn_Ammoniak_Schiff	Syn_Diesel_Schiff	Syn_LNG_Schiff	Syn_Methanol_Schiff
Kraftstoff			100 % Ammoniak	100 % FT-Diesel	100 % Methan	100 % Methanol
1) Wie sinnvoll sind MEM aus ökologisch-systemischer Sicht?	1.1) Sinnhaftigkeit von MEM aus systemischer Sicht	Wie weit ist die alternative Technologie in unterschiedlichen Bereichen durchschnittlich entwickelt (gemessen in Technology Readiness Level (TRL))?	-1	-1	-1	-1
		Wie gut kann die alternative Technologie die Mobilitäts- und Transportbedürfnisse erfüllen?	+2	+2	+2	+2
		Gesamt 1.1	+1	+1	+1	+1
	1.2) Sinnhaftigkeit eines MEM zum Schutz der Ressourcen	Wirkungsgrad der Herstellung	0	0	0	0
		C-Ausnutzungsgrad (Zielfuel)	+4	-1	+4	+4
		C-Ausnutzungsgrad (Summe der Elemente)	+4	+3	+3	+3
		Flächenverbrauch	-3	-4	-3	-3
		Gesamt 1.2	+1	-1	+1	+1
	<b>Gesamt 1</b>		<b>+1</b>	<b>0</b>	<b>+1</b>	<b>+1</b>

Kraftstoffpfad			Syn_Ammoniak_Schiff	Syn_Diesel_Schiff	Syn_LNG_Schiff	Syn_Methanol_Schiff
Kraftstoff			100 % Ammoniak	100 % FT-Diesel	100 % Methan	100 % Methanol
2) Kann aus nachfrage-seitiger Sicht auf MEM verzichtet werden?	2.1) Bezahlbarkeit	Veränderung der Ausgaben der privaten Haushalte gemessen an den Konsumausgaben	-1	-1	-1	-1
		Veränderung der Produktionskosten	-1	-1	-1	-1
		<b>Gesamt 2</b>	<b>-1</b>	<b>-1</b>	<b>-1</b>	<b>-1</b>
3) Kann aus angebotsseitiger Sicht auf MEM verzichtet werden?	3.1) Upstream	Wie kompatibel ist der Kraftstoffpfad mit bestehender Infrastruktur zur Herstellung synthetischer Kraftstoffe?	+1	+1	-1	+1
		Wie groß ist der Bedarf an Koppelprodukten der Herstellung?	-4	+4	-4	-4
		<b>Gesamt 3.1</b>	<b>0</b>	<b>+2</b>	<b>-2</b>	<b>0</b>
	3.2) Mid-stream	Wie kompatibel ist der Kraftstoffpfad mit bestehender Infrastruktur zum Transport und der Betankung?	-2	+4	+4	-1
	3.3) Downstream	Wie kompatibel ist der Kraftstoffpfad mit der bestehenden Fahrzeugflotte?	-4	+4	0	0
		Wie kompatibel ist der Kraftstoff mit bestehenden Normen / Regularien?	-3	+3	+4	+1
		<b>Gesamt 3.3</b>	<b>-4</b>	<b>+4</b>	<b>+2</b>	<b>+1</b>
	<b>Gesamt 3</b>	<b>-2</b>	<b>+3</b>	<b>+1</b>	<b>0</b>	

### 1) Wie sinnvoll sind MEM aus ökologisch-systemischer Sicht?

In der Schifffahrt ist der Entwicklungsstand von alternativen Technologien nur teilweise bei kleineren Schiffen und geringeren Entfernungen weit fortgeschritten und auch die Abdeckung ist aus heutiger Sicht nicht vollständig, wie in Kapitel 3.7 in Tabelle 3-17 beschrieben. In der Schifffahrt ist es deshalb aus systemischer Sicht sinnvoll, MEM einzuführen. Analog zum Bereich schwere Nutzfahrzeuge haben Methan und Methanol eine höhere Ressourceneffizienz als der Dieselmotorkraftstoff, und bezogen auf diese wären MEM für Methan und Methanol deshalb sinnvoll. Auch Ammoniak ist bezogen auf die Ressourceneffizienz als gut einzuschätzen, da kein knappes Gut, d. h. Kohlenstoff, für die Herstellung benötigt wird. Insgesamt sind für MEM ebenfalls Methan, Methanol und Ammoniak zu empfehlen. Der Dieselmotorkraftstoff könnte im Vergleich dazu nur bedingt für MEM aus ökologisch-systemischer Sicht empfohlen werden.

### 2) Wie notwendig sind MEM aus nachfrageseitiger Sichtweise?

Die Belastungen für Verbrauchende und der Produktion sind bei allen betrachteten Pfaden ähnlich hoch. Da Mehrbelastungen für alle Kraftstoffe zu erwarten sind, könnte aus Nachfragesicht bei keinem der Pfade auf die Nutzung von MEM verzichtet werden.

### 3) Wie notwendig sind MEM aus angebotsseitiger Sichtweise?

Bei den Infrastrukturimplikationen schneiden Diesel und Methan mit den geringsten Anpassungsbedarfen am besten ab. Beide bedürften keiner MEM aus Angebotsicht. Für Methanol ergibt sich ein geteiltes Bild: Hier wären MEM vielleicht notwendig. Ammoniak schneidet, besonders bezogen auf den Midstream- und Downstream-Bereich, sehr schlecht ab und würde eine Flankierung durch MEM benötigen.

### Fazit

Aufgrund einer Lücke bei guten Alternativen in Teilen der Hochseeschifffahrt, erscheint die Notwendigkeit für MEM im Bereich Schifffahrt wahrscheinlich. Diese ist vor allem durch die Nachfrageseite begründet.

**Bereich Luftfahrt:****Tabelle 4-35** Bewertungsübersicht Markteinführung: Bereich Luftfahrt

Kraftstoffpfad			Syn_SAF50_Luft	Syn_SAF100_Luft
Kraftstoff			50 % Vol SAF + 50 % Vol fossiles Kerosin	100 % SAF
1) Wie sinnvoll sind MEM aus ökologisch-systemischer Sicht?	1.1) Sinnhaftigkeit von MEM aus systemischer Sicht	Wie weit ist die alternative Technologie in unterschiedlichen Bereichen durchschnittlich entwickelt (gemessen in Technology Readiness Level (TRL))?	0	0
		Wie gut kann die alternative Technologie die Mobilitäts- und Transportbedürfnisse erfüllen?	+2	+2
		Gesamt 1.1	+1	+1
	1.2) Sinnhaftigkeit eines MEM zum Schutz der Ressourcen	Wirkungsgrad der Herstellung	0	0
		C-Ausnutzungsgrad (Zielfuel)	-2	-2
		C-Ausnutzungsgrad (Summe der Elemente)	+3	+3
		Flächenverbrauch	-4	-4
		Gesamt 1.2	-1	-1
	<b>Gesamt 1</b>		<b>0</b>	<b>0</b>

Kraftstoffpfad			Syn_SAF50_Luft	Syn_SAF100_Luft
Kraftstoff			50 %Vol SAF + 50 %Vol fossiles Kerosin	100 % SAF
2) Kann aus nachfrageseitiger Sicht auf MEM verzichtet werden?	2.1) Bezahlbarkeit	Veränderung der Ausgaben der privaten Haushalte gemessen an den Konsumausgaben	-1	-1
		Veränderung der Produktionskosten	-1	-2
		<b>Gesamt 2</b>	<b>-1</b>	<b>-2</b>
3) Kann aus angebotsseitiger Sicht auf MEM verzichtet werden?	3.1) Upstream	Wie kompatibel ist der Kraftstoffpfad mit bestehender Infrastruktur zur Herstellung synthetischer Kraftstoffe?	+1	+1
		Wie groß ist der Bedarf an Koppelprodukten der Herstellung?	+4	+4
		<b>Gesamt 3.1</b>	<b>+2</b>	<b>+2</b>
	3.2) Midstream	Wie kompatibel ist der Kraftstoffpfad mit bestehender Infrastruktur zum Transport und der Betankung?	+3	+3
	3.3) Downstream	Wie kompatibel ist der Kraftstoffpfad mit der bestehenden Fahrzeugflotte?	+4	+4
		Wie kompatibel ist der Kraftstoff mit bestehenden Normen / Regularien?	+4	+1
		<b>Gesamt 3.3</b>	<b>+4</b>	<b>+3</b>
	<b>Gesamt 3</b>		<b>+3</b>	<b>+3</b>

### 1) Wie sinnvoll sind MEM aus ökologisch-systemischer Sicht?

In der Luftfahrt ist der Entwicklungsstand von alternativen Technologien weitgehend im Bereich von Versuchsaufbauten im Labor, wie in Kapitel 3.7 in Tabelle 3-17 beschrieben. Auch können nicht alle Bereiche abgedeckt werden. Deshalb sind hier MEM aus systemischer Sicht sinnvoll. Insgesamt ist synthetisches Kerosin in der Luftfahrt, aufgrund seines Ressourcenverbrauchs in der Herstellung, nur bedingt sinnvoll aus ökologisch-systemischer Sicht, weswegen auch hier ein ressourceneffizienter Umgang angestrebt werden sollte.

### 2) Wie notwendig sind MEM aus nachfrageseitiger Sichtweise?

Die Belastungen für Verbrauchende und die Produktion steigen bei beiden betrachteten Pfaden, sowohl beim Reinstoff (#1) als auch beim 50 % Blend (#2). Bei der Produktion sind die Belastungen beim Reinstoff aber merkbar höher als beim Blend. Bei beiden Kraftstoffpfaden könnte folglich nicht auf MEM verzichtet werden.

### 3) Kann aus angebotsseitiger Sicht auf MEM verzichtet werden?

Bezogen auf die Infrastruktur ist synthetisches Kerosin, sowohl als Blend als auch als Reinstoff, mit der Infrastruktur im Upstream und Midstreambereich kompatibel. Im Downstreambereich sind für den Reinstoff geringere Anpassungen notwendig. Für beide Kraftstoffe wären aus Angebotssicht keine MEM notwendig.

### Fazit

Wie in der Schifffahrt, besteht auch für den Luftfahrtbereich auf der Langstrecke eine Lücke an guten Alternativen, welche die Notwendigkeit von MEM wahrscheinlich erscheinen lässt. Die Notwendigkeit ist auch hier vor allem durch die Nachfrageseite begründet.

## 5 Vergleich der spezifischen Kraftstoffpfade der EiV-Verbundvorhaben

### Übersicht der spezifischen Kraftstoffpfade der EiV-Verbundvorhaben

Wie in Kapitel 2.6 beschrieben, spiegeln die spezifischen Kraftstoffpfade die Forschungsinhalte der EiV-Verbundvorhaben wider. Tabelle 5-1 zeigt die Übersicht der Bewertung.

**Tabelle 5-1:** Bewertung der spezifischen Kraftstoffpfade der EiV-Verbundvorhaben

Pfadname	Fokus-Bereich	Kraftstoff-klasse	Integration ins Energiesystem			Techno-ökonomische Bewertung der Herstellung					Kraftstoffnutzung					Integration ins Verkehrs-system			Ökologische Bewertung							Akzeptanz			Marktein-führung		
			Differenzkosten des Energiesystems	Strukturelle Veränderung des Energiesystems	Ausgenutzte Ressourcenpotenziale	Effizienz der Herstellung	Kosten im Jahr 2018	Kosten im Jahr 2030	Kosten im Jahr 2045	Flexibilisierungsoptionen	Umwelteigenschaften	Energieinhalt	Sicherheit, Handhabung (inkl. Haltbarkeit und Lagerfähigkeit)	Kompatibilität Normen / Regularien	Kompatibilität Technik	Kosten der Fahrzeughaltung	Tankvorgang	Tankinfrastruktur	Treibhausgasemissionen 2018	Treibhausgasemissionen 2030	Treibhausgasemissionen 2045	Kumulierter Energieaufwand 2018	Kumulierter Energieaufwand 2030	Kumulierter Energieaufwand 2045	Ursprung des verwendeten CO <sub>2</sub>	Kosten / Nutzen	Umweltwirkungen	Anwendungstauglichkeit	Ökologisch-systemische Notwendigkeit von MEM	Nachfrageseitige Notwendigkeit von MEM	Angebotsseitige Notwendigkeit von MEM
C3Mobility_#1.1	Schiff	Methanol	+4	+2	+2	+2	0	+1	+2	k.A.	+2	-1	-1	+1	0	-3	+2	-1	-1	+3	+4	+2	+3	+4	0	+2	+2	0	+1	-1	0
C3Mobility_#1.2	Straße (SNF)	Methanol	+4	+2	+2	+2	0	+1	+2	k.A.	+2	-1	-1	-3	-3	-2	+1	-1	-2	+3	+4	-2	+2	+3	0	+2	+1	-1	-1	-2	-1
C3Mobility_#2	Straße (LNF)	DME	+4	+2	+2	+2	0	+1	+2	k.A.	+2	-1	-1	+1	-3	-2	+2	-2	-1	+3	+4	-1	+3	+4	0	+2	0	-1	-2	-1	-2
C3Mobility_#3.1	Straße (Pkw)	Benzin	+3	+1	+1	0	-1	0	+2	k.A.	-1	+2	0	+2	+3	-3	+4	+4	-2	+3	+4	-3	+2	+3	0	+1	+1	+2	-2	-3	+2
C3Mobility_#4.1	Straße (LNF)	Butanol	+4	+1	+1	-2	-2	-1	+1	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	0	0	0	k.A.	-3	-1	k.A.
C3Mobility_#5	Straße (Pkw)	Oktanol	+3	+1	+1	-2	-3	-2	+1	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	0	0	0	k.A.	-3	-3	k.A.
CombiFuel_#1.1	Straße (LNF)	Hythan	+4	+4	+4	+4	+4	+4	+4	+4	+1	-2	-1	0	-1	-2	+2	-4	+2	+3	+3	+1	+3	+3	+2	+4	+3	-1	-1	+1	-2
E2Fuels_#1.1	Schifffahrt	Methan	+3	+1	+1	+1	0	+1	+3	k.A.	+1	0	-1	+4	+1	-3	+3	+4	0	+3	+4	+2	+3	+4	0	+1	+2	+1	+1	-1	+1
E2Fuels_#2.1	Schifffahrt	Methanol	+4	+2	+2	+1	-1	0	+2	k.A.	+2	-1	-1	+1	0	-3	+2	-1	-1	+3	+4	+1	+3	+4	0	+1	+2	0	+1	-1	0
E2Fuels_#3.1	Straße (SNF)	OME	k.A.	k.A.	k.A.	-1	-2	-1	+1	k.A.	0	+2	+1	-2	-1	k.A.	+2	-1	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	0	-1	0	0	-2	-2	-2
E2Fuels_#4	Rückverstromung	Hythan	+3	+1	+1	+2	0	+1	+2	k.A.	+1	-2	-1	+1	+2	-4	+4	0	-2	+3	+4	-2	+2	+4	0	+1	+1	0	k.A.	k.A.	k.A.
FlexDME_#1	Straße (SNF)	DME	+4	+4	+4	-1	0	0	0	+2	+2	-1	-1	+1	-3	-3	+2	-1	-1	+1	0	0	+2	+1	+2	+2	+1	-1	-3	-2	0
ISys-tem4EFuel_#1.1	Schifffahrt	OME	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	0	+2	+1	-2	0	+1	+3	-2	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	0	k.A.	0	0	k.A.	k.A.	-1
ISys-tem4EFuel_#2.1	Schifffahrt	Diesel	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	-1	+3	+1	+3	+3	+3	+4	+3	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	0	k.A.	-1	+3	k.A.	k.A.	+3
KEROSyN100_#1	Luftfahrt	Kerosin	+4	+3	+3	0	+2	+2	+3	0	-2	+3	+1	+1	+4	0	+4	+3	-3	+3	+4	-3	+2	+4	-2	+2	0	+2	+1	-1	+1



Pfadname	Fokus-Bereich	Kraftstoff-klasse	Integration ins Energiesystem			Techno-ökonomische Bewertung der Herstellung					Kraftstoffnutzung					Integration ins Verkehrssystem			Ökologische Bewertung							Akzeptanz			Markteinführung		
			Differenzkosten des Energiesystems	Strukturelle Veränderung des Energiesystems	Ausgenutzte Ressourcenpotenziale	Effizienz der Herstellung	Kosten im Jahr 2018	Kosten im Jahr 2030	Kosten im Jahr 2045	Flexibilisierungsoptionen	Umwelteigenschaften	Energieinhalt	Sicherheit, Handhabung (inkl. Haltbarkeit und Lagerfähigkeit)	Kompatibilität Normen / Regularien	Kompatibilität Technik	Kosten der Fahrzeughaltung	Tankvorgang	Tankinfrastruktur	Treibhausgasemissionen 2018	Treibhausgasemissionen 2030	Treibhausgasemissionen 2045	Kumulierter Energieaufwand 2018	Kumulierter Energieaufwand 2030	Kumulierter Energieaufwand 2045	Ursprung des verwendeten CO <sub>2</sub>	Kosten / Nutzen	Umweltwirkungen	Anwendungstauglichkeit	Ökologisch-systemische Notwendigkeit von MEM	Nachfrageseitige Notwendigkeit von MEM	Angebotsseitige Notwendigkeit von MEM
LeanStoichH2_#1	Rückverstromung	Hythan	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	+2	-2	-1	0	+1	-4	+4	0	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	-2	k.A.	0	0	k.A.	k.A.	k.A.
MEEMO_#1	Straße (Pkw)	Methanol	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	+2	-1	0	-3	-1	-3	+2	-2	-1	+3	+4	-2	+2	+3	+2	k.A.	+2	-1	k.A.	k.A.	-1
MethQuest_#1	Straße (Pkw)	Methan	+4	+3	+3	0	-2	-1	+2	+1	+1	-2	-1	+4	+1	-4	+3	-1	-2	+3	+4	-3	+2	+3	+2	+1	+1	0	-2	-3	0
MethQuest_#4	Rückverstromung	Methan	+4	+3	+3	+2	0	+2	+3	k.A.	+1	-2	-1	+4	+4	-4	+4	+4	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	-2	+2	-1	+1	k.A.	k.A.	k.A.
MethQuest_#5	Schifffahrt	Methan	+4	+3	+3	+2	-1	+1	+3	k.A.	+1	0	-1	+4	+1	-3	+3	+4	-2	+3	+4	+1	+3	+4	+4	+2	+2	+1	+2	-1	+1
NAMOSYN_#1.1	Straße (Pkw)	OME	+4	+3	+4	-2	-3	-2	-1	k.A.	+2	0	0	-1	-3	k.A.	+2	-2	-4	+3	+4	-4	+2	+4	0	0	+1	-1	-3	-3	-2
NAMOSYN_#2.1	Straße (Pkw)	DMC/MeFo	+4	+2	+2	0	-2	-1	0	k.A.	+2	0	0	-2	-4	k.A.	+4	-2	-4	+2	+4	-4	+2	+4	0	+1	+1	-1	-2	-3	-2
NAMOSYN_#2.2	Straße (Pkw)	MeFo	+4	+2	+2	0	-1	0	+1	k.A.	+2	0	0	-2	-4	k.A.	k.A.	-2	0	0	0	0	0	0	0	+1	+1	-2	-2	-3	-2
PlasmaFuel_#1	Schifffahrt	Diesel	0	-4	-4	-4	-3	-3	-1	-2	0	+2	+1	+3	+4	-4	+4	+4	-4	+1	+2	-4	+3	+4	0	-3	0	+2	-1	-2	+3
PowerFuel_#1.1	Luftfahrt	Kerosin	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	-2	+3	+1	+4	+4	0	+4	+3	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	+4	k.A.	+1	+3	k.A.	k.A.	+3
PowerFuel_#2.1	Luftfahrt	Kerosin	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	-2	+3	+1	+3	+4	0	+4	+3	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	+4	k.A.	+1	+3	k.A.	k.A.	+2
SolareKraftstoffe_#1	Straße (Pkw)	Benzin	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	-1	+2	0	+4	+4	k.A.	+4	+4	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	0	k.A.	-1	+3	k.A.	k.A.	+3
SolareKraftstoffe_#2	Straße (Pkw)	Benzin	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	-1	+2	0	+4	+3	k.A.	+4	+4	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	0	k.A.	-1	+3	k.A.	k.A.	+3
SynLink_#1.1	Straße (SNF)	Diesel	+3	0	0	-1	+1	+3	+3	0	-1	+2	0	+3	+3	0	+4	+4	0	+3	+3	0	+2	+3	+4	+1	+2	+2	-2	-1	+2
SynLink_#1.2	Straße (SNF)	Diesel	+3	+1	+1	-2	-3	+1	+2	-1	-1	+2	+1	+3	+3	-4	+4	+2	-3	+3	+4	-3	+2	+4	+4	-1	+1	+2	-2	-2	+2
SynLink_#1.3	Straße (SNF)	Diesel	+3	+1	+1	-1	-3	0	+2	-2	0	+2	+1	+3	+3	-4	+4	+2	-4	+3	+4	-4	+2	+4	+4	-1	+1	+2	-2	-2	+2
SynLink_#2.1	Schifffahrt	Methanol	+4	+4	+4	-1	-3	0	+2	-1	+2	-1	-1	+1	0	-3	+2	-1	-2	+3	+4	0	+3	+4	+4	+1	+2	0	+1	-1	-1
SynLink_#2.2	Straße (Pkw)	Methanol	+4	+4	+4	-1	+3	+4	+4	+1	-1	+1	0	-1	0	k.A.	k.A.	-2	+2	+3	+3	+2	+2	+3	+4	+3	+2	0	-2	-2	-2

## 5.1 Integration ins Energiesystem

Analog zu Kapitel 4.1 wurden die spezifischen Pfade in das REMix Modell (vgl. Kapitel 6.8) eingebunden und es wurde der zusätzliche Aufwand für die Herstellung der Kraftstoffe bestimmt. Die Parameter wurden dabei aus den Fragebogen bestimmt. Wesentliche Parameter waren der Wirkungsgrad von Strom zu Zielprodukt und die Investitionen pro  $MWh_{chem}$  des Zielproduktes. Wurde keine Wasserstoffquelle angegeben, so wurde die Elektrolyse aus den generischen Pfaden übernommen. Die Investitionen wurden aus den Kapitelkosten und der Anlagenkapazität in t/a berechnet.

Die einzelnen Bewertungen können aus Tabelle 5-1 entnommen werden. Dabei variieren die einzelnen Bewertungen nur wenig und bewegen sich im Bereich der Bewertungen der generischen Pfade. Einzelne Pfade stechen durch abweichende Bewertungen hervor, die Fischer-Tropsch-Pfade aus dem SynLink Projekt durch ihre spezifischen hohen Investitionskosten und die Kerosinherstellung aus dem Plasmafuel-Pfad, der durch das spezifische Verfahren einen insgesamt geringen Wirkungsgrad hat.

Insgesamt zeigen sich nur geringe Unterschiede in den Pfaden, sodass für die einzelnen Pfade die konkrete Systemintegration des konkreten Projektes die wesentliche Rolle spielen wird.

## 5.2 Techno-ökonomische Bewertung der Herstellung

In diesem Unterkapitel werden die Ergebnisse der Kraftstoffherstellungspfade aus den Verbänden vorgestellt. Dabei werden in den folgenden Unterkapiteln die Pfade nach den Kraftstoffen geclustert. Nicht alle Verbände aus der Förderinitiative wurden berücksichtigt. Einige Verbände haben keine Kraftstoffherstellung betrachtet und ein Verbund hat die Ergebnisübergabe verweigert. Siehe dazu Tabelle 5-2

**Tabelle 5-2:** Verbände ohne Zusammenarbeit mit TÖA

Begründung	Keine Herstellung betrachtet	Keine Zusammenarbeit mit TÖA
Verbund	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Sharc</li> <li>• LeanStoichH<sub>2</sub></li> <li>• ISystem4EFuel</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• PowerFuel</li> </ul>

Bei manchen Kraftstoffpfaden besteht das finale Produkt aus einer Mischung von fossilen und strombasierten Kraftstoffkomponenten. Für den Vergleich sind im weiteren Verlauf nur die Kosten für den strombasierten Teil dargestellt.

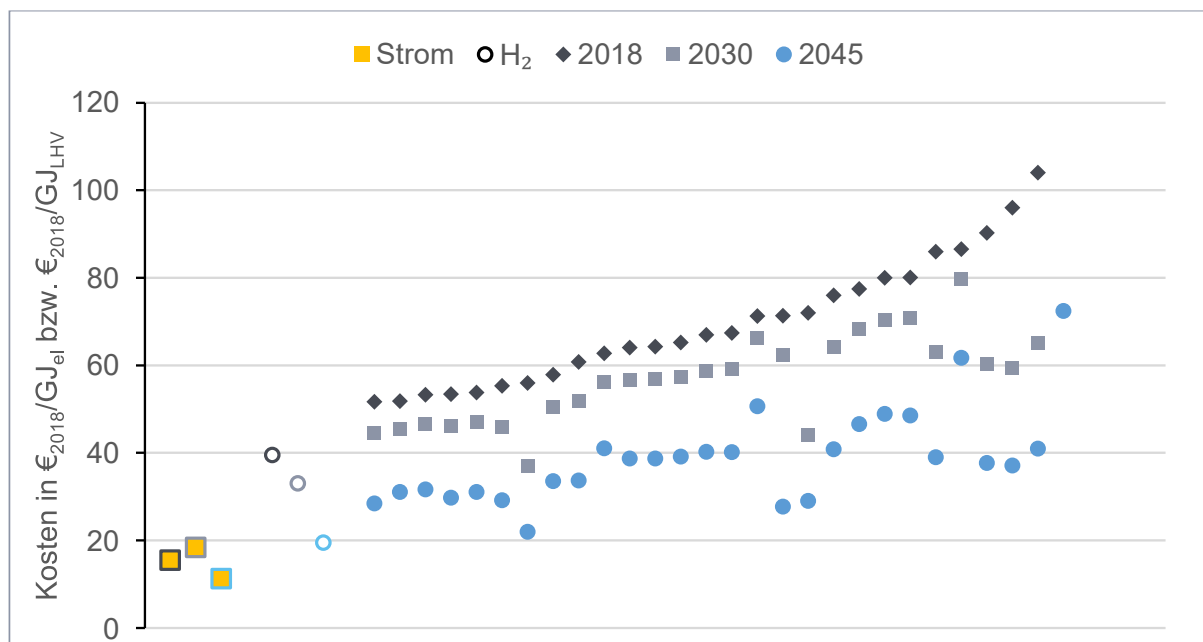
Als zusätzliche Stütze sind Preise einiger heute verfügbarer Kraftstoffe in Tabelle 5-3 aufgelistet. Dies dient einzig der Einordnung, da je nach Kraftstoff unterschiedliche Gewinnmargen, Kosten für Transport, Steuern und weitere Abgaben anfallen. Diese Aspekte wurden bei den Gestehungskosten der strombasierten Kraftstoffe nicht berücksichtigt.

**Tabelle 5-3:** Größenordnung heutiger Kraftstoffpreise

Kraftstoff	Preis	Preis in €/GJ <sub>LHV</sub>	Quellen
H <sub>2</sub> an Tankstelle	12,85 €/kg	107	
Kerosin	1,6 €/Gallone	8,3	[IndexMundi]
Benzin an Tankstelle	2,0 €/l	36	
Schiffsdiesel (VLSFO)*	900 \$/t	21	[Ship & Bunker 2022b]
Schiffsdiesel (IFO380)	600 \$/t	15	[Ship & Bunker 2022a]

\*VLSFO = "Very low sulfur fuel oil" mit max. 0.5 % Schwefel

Als allgemeine Übersicht sind in Abbildung 5-1 je die minimalen Kosten für Netzstrom, generischen Wasserstoff und die Gestehungskosten aller großskaligen Pfade mit einer Anlagenlaufzeit von 8.000 h/a aufgetragen. Dabei wurden die Kraftstoffpfade bzgl. der Kosten im Bezugsjahr 2018 in aufsteigender Reihenfolge sortiert. Die Punkte welche sich direkt übereinander befinden, gehören je zu dem gleichen Pfad und geben die Kosten in den jeweiligen Stützjahren wieder.



**Abbildung 5-1:** Übersicht über Gestehungskosten aller großskaligen Pfade | Laufzeit von 8.000 h/a und je minimale Werte (teuerster Pfad im Jahr 2018 nicht dargestellt)

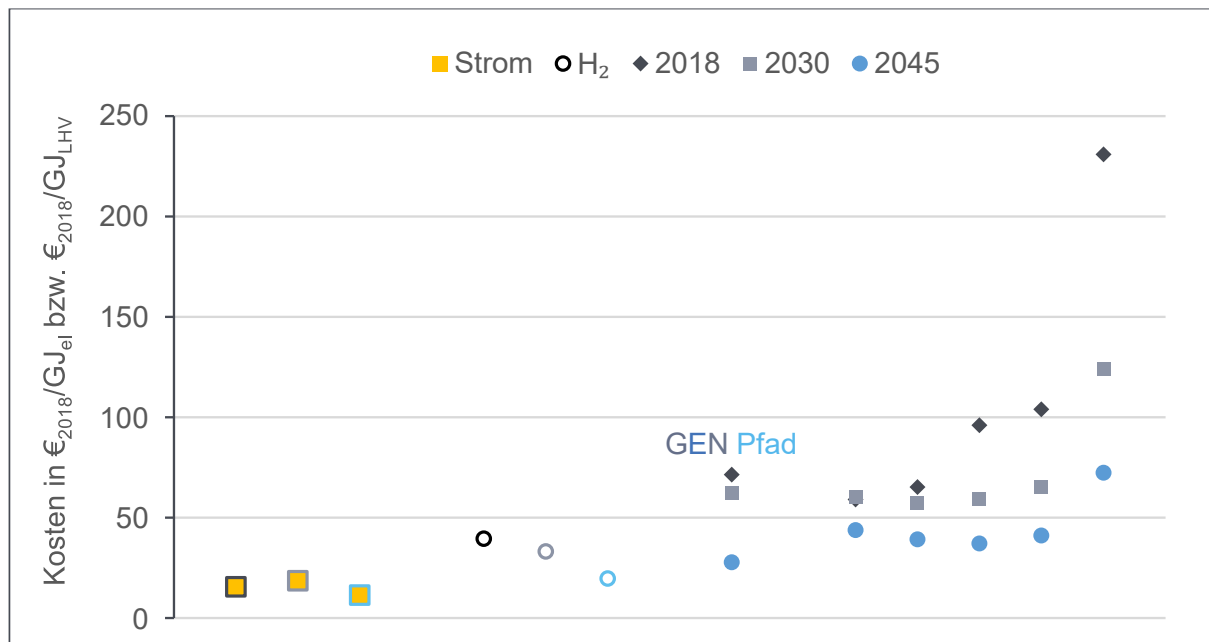
Aus Abbildung 5-1 ist ersichtlich, in welcher Größenordnung sich Kraftstoffgestehungskosten beim heutigen Wissensstand und in Zukunft bewegen sowie um welchen Faktor sich die spezifischen Kosten pro Energieeinheit erhöhen, wenn elektrische Energie in den chemischen



um einen klassischen PtX-Prozess handelt, sondern um einen Entsorgungsprozess bei welchem Wasserstoff als Nebenprodukt anfällt und bei den Kosten die Entsorgung als Vergütung mitberücksichtigt wurde.

### **Flüssige Kohlenwasserstoffe**

In Abbildung 5-3 sind die minimalen Gestehungskosten der flüssigen Kohlenwasserstoffe abgebildet. Das Ergebnis des generischen Pfades der FT-Synthese ist mit „GEN Pfad“ gekennzeichnet.

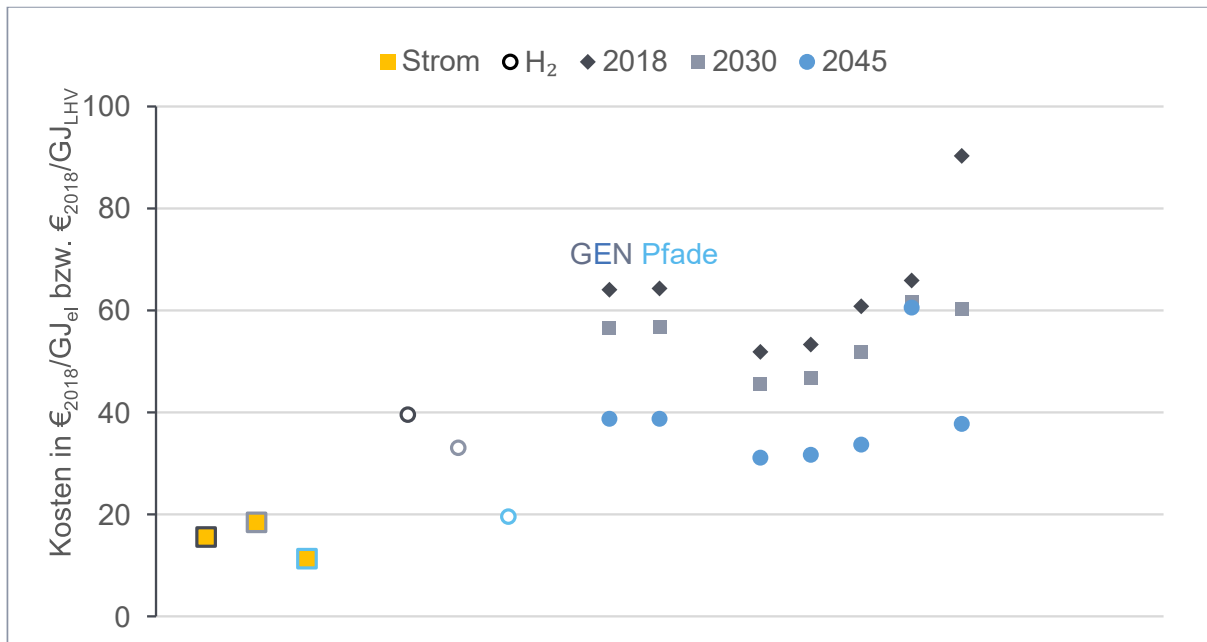


**Abbildung 5-3:** Gestehungskosten der Kohlenwasserstoffpfade

Da die Kosten für Benzin, Kerosin und Diesel sich im generischen Pfad nicht unterscheiden, ist nur ein BEniVer Referenzpfad in Abbildung 5-3 dargestellt. Die beiden günstigsten Herstellungspfade decken sich mit dem generischen Pfad bzw. sind etwas ökonomischer. Bei diesen beide Pfaden handelt es sich um Synthesen, welche auf Methanol basieren und keine Fischer-Tropsch-Synthese beinhalten.

### **Methanol und DME**

In Abbildung 5-4 sind die minimalen Gestehungskosten für Methanol und DME abgebildet. Die Ergebnisse der generischen Methanol- und DME-Synthese sind mit „GEN Pfade“ gekennzeichnet.



**Abbildung 5-4:** Gestehungskosten der Methanol- und DME-Pfade

Aus den Ergebnissen der Abbildung 5-4 ist ersichtlich, dass die Kosten in BEniVer im Vergleich zu den Kosten aus der Förderinitiative etwas höher sind. Dies lässt sich durch die vergleichsweise komplexere Prozessführung des Referenzpfades, im Vergleich zu den Verbundpfaden, erklären. Ein Verbundpfad ist relativ auffällig, bei welchem sich die Kosten perspektivisch nur geringfügig verändern. Bei diesem Pfad handelt es sich ebenfalls nicht um einen klassischen PtX-Prozess, da ansonsten die Abhängigkeit vom Strompreis deutlicher ausfallen würde.

### Restliche Oxygenate auf Basis von Methanol

Methanol kann nicht nur als Reinstoff, sondern auch als Ausgangsprodukt für die weitere Synthese von Kraftstoffen verwendet werden. Die MtG- sowie die MtK-Route (Methanol-to-Gasoline bzw. Kerosene) sind Beispiele, bei welchen das finale Produkt Kohlenwasserstoffe sind. Zwei Pfade aus Abbildung 5-3 basieren je auf diesem Konzept. Methanol ist jedoch auch das Ausgangsprodukt für die OME-Synthese sowie die Synthese von höheren Alkoholen wie beispielsweise Butanol. In Abbildung 5-5 sind die minimalen Gestehungskosten für diese Oxygenate auf Methanolbasis abgebildet.

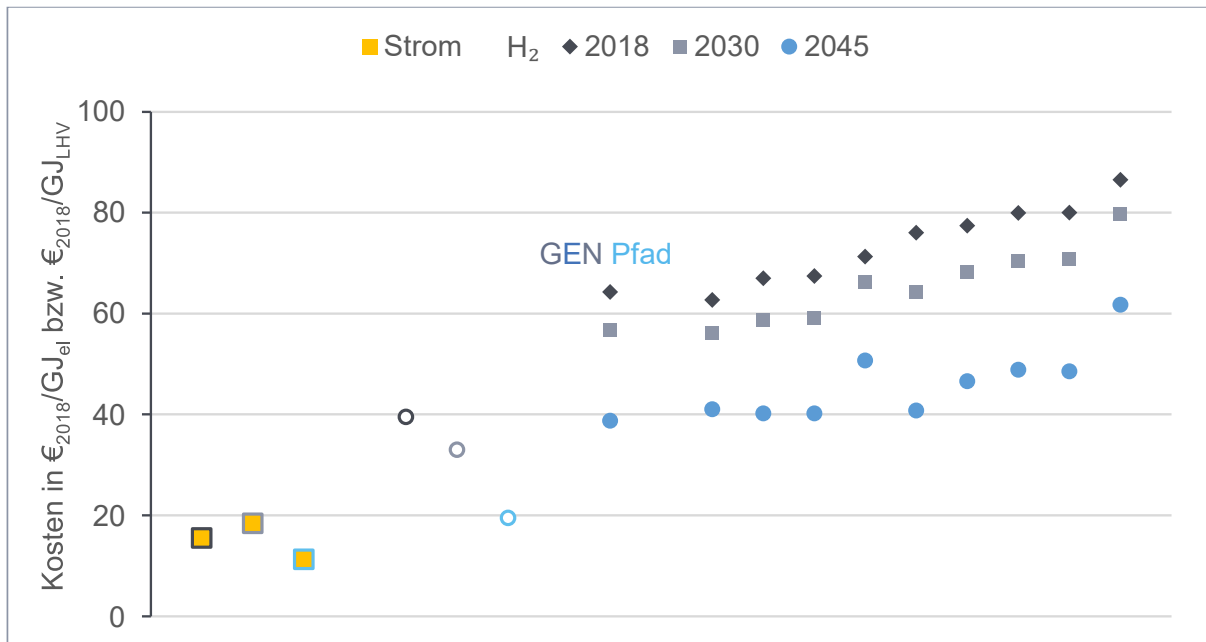


Abbildung 5-5: Gesteuerungskosten der Oxygenate auf Methanolbasis

Da es keinen BEniVer-Referenzpfad gibt bei welchem Methanol zu OME oder anderen höheren Alkoholen verarbeitet wird, sind in Abbildung 5-5 die Kosten für die generische Methanol-Synthese abgebildet. Die Bewertung aller Pfade ist in Tabelle 5-4 abgebildet. Die Clusterung erfolgt dabei jedoch nicht nach Art des Kraftstoffes, sondern nach dem spezifischen Einsatzgebiet.

Tabelle 5-4: Bewertung der verbundspezifischen Kraftstoffpfade

Verkehrssektor	Schifffahrt					Luftfahrt			Straße SNF			Straße LNF		Straße PKW					Rückverstromung															
	C3Mobility_#1.1	E2Fuels_#1.1	E2Fuels_#2.1	ISystem4EFuel_#1.1	ISystem4EFuel_#2.1	MethQuest_#5	PlasmaFuel_#1	SynLink_#2.1	KEROSYN100_#1	PowerFuel_#1.1	PowerFuel_#2.1	C3Mobility_#1.2	E2Fuels_#3.1	FlexDME_#1	SynLink_#1.1	SynLink_#1.2	SynLink_#1.3	C3Mobility_#2	C3Mobility_#4.1	CombiFuel_#1.1	C3Mobility_#3.1	C3Mobility_#5	MEEMO_#1	MethQuest_#1	NAMOSYN_#1.1	NAMOSYN_#2.1	NAMOSYN_#2.2	SolareKraftstoffe_#1	SolareKraftstoffe_#2	SynLink_#2.2	E2Fuels_#4	LeanStoicH2_#1	MethQuest_#4	
Kraftstoff	Methanol	Methan	Methanol	OME	Diesel	Methan	Diesel	Methanol	Kerosin	Kerosin	Kerosin	Methanol	OME	DME	Diesel	Diesel	Diesel	DME	Butanol	Hythan	MtG Benzin	Okтанol	Methanol	Metham	OME	DMC/MeFo	MeFo	Benzin	Benzin	Methanol	Hythan	Hythan	Methan	
Effizienz der Herstellung	+2	+1	0	n.a.	n.a.	+2	-4	-1	0	k.A.	k.A.	+2	-1	-1	k.A.	-2	-1	+1	-2	+4	0	-2	k.A.	0	-2	0	0	n.a.	n.a.	-1	+2	n.a.	+2	
Kosten im Jahr 2018	0	+1	+1	n.a.	n.a.	-1	-3	-3	+2	k.A.	k.A.	0	-2	0	k.A.	-3	-3	0	-2	+4	-1	-3	k.A.	-2	-3	-2	-1	n.a.	n.a.	-3	0	n.a.	0	
Kosten im Jahr 2030	+1	0	-1	n.a.	n.a.	+1	-3	0	+2	k.A.	k.A.	+1	-1	0	k.A.	+1	0	+1	-1	+4	0	-2	k.A.	-1	-2	-1	0	n.a.	n.a.	0	+1	n.a.	+2	
Kosten im Jahr 2045	+2	+1	0	n.a.	n.a.	+3	-1	+2	+3	k.A.	k.A.	+2	+1	0	k.A.	+2	+2	+2	+1	+4	+2	+1	k.A.	+2	-1	0	+1	n.a.	n.a.	+2	+2	n.a.	+3	
Flexibilisierungsoptionen	n.a.	+3	+2	n.a.	n.a.	n.a.	-2	n.a.	0	k.A.	k.A.	n.a.	n.a.	+2	k.A.	n.a.	n.a.	n.a.	k.A.	+4	n.a.	n.a.	k.A.	+1	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.

## 5.3 Kraftstoffnutzung

### Bereich Pkw

Die Bewertung der insgesamt zehn verschiedenen spezifischen Kraftstoffpfade für die Anwendung im Pkw ist der Tabelle 5-5 zu entnehmen. Für die Anwendung im Pkw wurden überwiegend flüssige Kraftstoffe – synthetisches Benzin und Methanol sowie weitere oxygenierte Kraftstoffe – beforcht. Manche Kraftstoffe – Methanol und synthetisches Benzin – werden von mehreren Kraftstoffpfaden betrachtet. Lediglich MethQuest hat die Nutzung von synthetischem CNG (Compressed Natural Gas) betrachtet (MethQuest\_#1), welches in Erdgasfahrzeugen direkt verwendet werden kann.

Die Bewertung der **synthetischen Benzine** aus den Pfaden C3Mobility\_#3.1 (MtG) und SolareKraftstoffe\_#2 („bis zu 100 % erneuerbare Anteile in Norm EN 228 möglich“ [SolareKraftstoffe 2021]) erfolgt analog der Bewertung des generischen Fischer-Tropsch-Benzins. Lediglich bei der Bewertung der Normkonformität wurde ein Unterschied gemacht. Im Pfad SolareKraftstoffe\_#2 war die Normkonformität eine Vorgabe bei der Entwicklung der Mischung und wird deswegen als gegeben angesehen. Beim MtG aus C3Mobility\_#3.1 ist hingegen nicht klar, ob dieses als Reinkraftstoff mit der EN 228 konform ist. Dies muss abgeklärt werden und bedarf weiterer Untersuchungen. Zu den Benzin-Pfaden zählt auch SolareKraftstoffe\_#1 – hier handelt es sich um eine Kraftstoffmischung, welche aus 62 %<sub>Vol</sub> fossilem Benzin, 18 %<sub>Vol</sub> FT-Benzin und 20 %<sub>Vol</sub> MTBE (Methyltertiärbutylether) besteht. Aufgrund des hohen Anteils der oxygenierten Komponente (MTBE) werden die Umwelteigenschaften der Mischung ähnlich abgeschätzt wie für ein reines synthetisches Benzin. Durch die fossilen Anteile sind allerdings auch noch Schwefelverbindungen enthalten.

Die **oxygenierten Kraftstoffe** aus dem Verbund NAMOSYN wurden hinsichtlich ihrer Umwelteigenschaften analog dem Methanol bewertet, welches auch im Pfad MEEMO\_#1 betrachtet wird. Einzig die CO-Emissionen sind einen Grad schlechter (+2 statt +3), da bei Emissionsmessungen zum Teil leicht höhere Werte gemessen wurden [Blochum et al. 2021]. Die Bewertung für den Pfad NAMOSYN\_#2 erfolgt hier für reines Methylformiat (MeFo), da zu einer ursprünglich angedachten Mischung mit Methanol und / oder Benzin keine Angaben gemacht wurden. In ihren Umwelteigenschaften liegen die oxygenierten Kraftstoffe zwar deutlich vor den synthetischen Benzinkraftstoffen, hinsichtlich ihrer Kompatibilität fallen diese allerdings hinter den benzinähnlichen Kraftstoffen deutlich zurück, v.a. OME (Oxymethylenether), DMC (Dimethylcarbonat) und MeFo.

Im Pfad SynLink\_#2.2 wird eine Mischung von **15 %<sub>Vol</sub> Methanol in fossilem Benzin** betrachtet. Im Vergleich zum fossilen Benzin (siehe Bewertung der Referenzpfade) sind die Umwelteigenschaften leicht verbessert, der Energieinhalt ist etwas verringert. Auf die Handhabung hat der Zusatz von Methanol kaum einen Einfluss, da die Eigenschaften von Methanol mit denen von Benzin übereinstimmen, die Oktanzahl verbessert sich sogar. Da laut EN 228 maximal 3,7 %<sub>w</sub> Sauerstoff erlaubt sind, ist diese Kraftstoffmischung jedoch nicht normkonform (15 %<sub>Vol</sub> Methanol entsprechen 7,8 %<sub>w</sub> Sauerstoff). Der zulässige Sauerstoffanteil müsste erhöht werden. Der Aufwand für die Umrüstung wird seitens des Verbundes als „überschaubar“



eingestuft, zu Materialverträglichkeit und Drop-In-Fähigkeit liegen keine weiteren Informationen vor.

**Tabelle 5-5:** Bewertung der Verbundpfade für die Kraftstoffnutzung im Bereich Straße (Pkw)

Kraftstoffpfad		C3Mobility_#3.1	C3Mobility_#5	MEEMO_#1	MethQuest_#1	NAMOSYN_#1.1	NAMOSYN_#2.1	NAMOSYN_#2.2	SolareKraftstoffe_#1	SolareKraftstoffe_#2	SynLink_#2.2
		MtG-Benzin	Oktanol	Methanol	Methan	OME	65 % <sub>vol</sub> DMC + 35 % <sub>vol</sub> MeFo	MeFo	Benzin	Benzin	15 % <sub>vol</sub> Methanol + 85 % <sub>vol</sub> Benzin
1) Umwelt-eigenschaften	CO	-3	k.A.	+3	+2	+2	+2	+2	-3	-3	-2
	NO <sub>x</sub>	-2	k.A.	+1	-2	+1	+1	+1	-2	-2	-1
	Ruß / Partikel (Anzahl, Masse)	-1	k.A.	+3	+2	+3	+3	+3	-1	-1	-1
	unverbrannte KW (HC-Emission)	-1	k.A.	+3	0	+3	+3	+3	-1	-1	-1
	Schwefelverbindungen	+4	k.A.	+4	+4	+4	+4	+4	+1	+4	+1
	CO <sub>2</sub> und H <sub>2</sub> O (Verbrauch)	+2	k.A.	-1	+1	-1	-1	-1	+2	+2	+1
	weitere Schadstoffe	0	k.A.	-3	-4	-3	-3	-3	0	0	-1
	<b>gesamt</b>	<b>-1</b>	<b>k.A.</b>	<b>+2</b>	<b>+1</b>	<b>+2</b>	<b>+2</b>	<b>+2</b>	<b>-1</b>	<b>-1</b>	<b>-1</b>
2) Energie-inhalt	Energiedichte volumetrisch	+2	k.A.	-2	-3	-2	-2	-2	+2	+2	+1
	Energiedichte gravimetrisch	+2	k.A.	-2	+4	-2	-2	-2	+2	+2	+1
	Dichte (Stoffdichte)	+1	k.A.	+1	-3	+4	+4	+4	+1	+1	+1
	<b>gesamt</b>	<b>+2</b>	<b>k.A.</b>	<b>-1</b>	<b>-2</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>+2</b>	<b>+2</b>	<b>+1</b>
3) Sicherheit und Handhabung (inkl. Haltbarkeit und Lagerfähigkeit)	Siedepunkt / Siedebereich	0	k.A.	+2	-2	-1	0	0	0	0	0
	Dampfdruck	-2	k.A.	-1	n.a.	-3	-2	-2	-2	-2	-2
	Gefrierpunkt	+4	k.A.	+4	n.a.	+2	-1	-1	+4	+4	+4
	Zündtemperatur	+2	k.A.	+4	+4	+2	+4	+4	+2	+2	+2
	Zündgrenzen	0	k.A.	-2	-1	0	-1	-1	0	0	-1
	Oktanzahl / Cetanzahl / Methanzahl (oben) + Wobbeindex (unten)	0	k.A.	+4	0	+3	+4	+4	0	0	+1
	Flammpunkt	-4	k.A.	-3	n.a.	+1	-4	-4	-4	-4	-4
	Hygroskopizität	0	k.A.	-3	n.a.	-1	-3	-3	0	0	-1
	(Oxidations-) Stabilität	+2	k.A.	-1	+2	-1	-1	-1	+2	+2	0

Kraftstoffpfad		C3Mobility_#3.1	C3Mobility_#5	MEEMO_#1	MethQuest_#1	NAMOSYN_#1.1	NAMOSYN_#2.1	NAMOSYN_#2.2	SolareKraftstoffe_#1	SolareKraftstoffe_#2	SynLink_#2.2
Kraftstoff		MtG-Benzin	Oktanol	Methanol	Methan	OME	65 % <sub>vol</sub> DMC + 35 % <sub>vol</sub> MeFo	MeFo	Benzin	Benzin	15 % <sub>vol</sub> Methanol + 85 % <sub>vol</sub> Benzin
	Diffusivität	n.a.	k.A.	n.a.	0	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
	Oberflächenspannung	0	k.A.	0	n.a.	0	0	0	0	0	0
	Dynamische Viskosität	0	k.A.	0	n.a.	0	0	0	0	0	0
	Kinematische Viskosität	0	k.A.	0	n.a.	0	0	0	0	0	0
	Gefahrenpotenzial bei unsachgemäßer Anwendung	-3	k.A.	-3	-4	-1	-1	-1	-3	-3	-3
	<b>gesamt</b>	<b>0</b>	<b>k.A.</b>	<b>0</b>	<b>-1</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>
4) Normen/ Regularien	REACH	+4	k.A.	+4	+4	-2	+3	+3	+4	+4	+4
	Normen	+1	k.A.	-4	+4	0	-2	-2	+4	+4	-2
	Verordnungen	+4	k.A.	-2	+2	-4	-4	-4	+4	+4	-2
	<b>gesamt</b>	<b>+2</b>	<b>k.A.</b>	<b>-3</b>	<b>+4</b>	<b>-1</b>	<b>-2</b>	<b>-2</b>	<b>+4</b>	<b>+4</b>	<b>-1</b>
5) Technik	Umrüstung	+4	k.A.	-4	-2	-3	-4	-4	+4	+4	-1
	Materialverträglichkeit	+3	k.A.	0	+4	-3	-3	-3	+4	+3	0
	Drop-in-fähig	+3	k.A.	-1	+3	-3	-3	-3	+4	+3	0
	Anwendung bekannt / Erfahrung	+3	k.A.	+3	+3	-3	-4	-4	+3	+3	+3
	<b>gesamt</b>	<b>+3</b>	<b>k.A.</b>	<b>-1</b>	<b>+1</b>	<b>-3</b>	<b>-3</b>	<b>-3</b>	<b>+4</b>	<b>+3</b>	<b>0</b>

Im Pfad C3Mobility\_#5 war ursprünglich eine Mischung aus Oktanol mit fossilem Kraftstoff vorgesehen, allerdings wurden hierzu keine Angaben gemacht, weswegen auch keine Bewertung für reines Oktanol erfolgte. Rein von den Eigenschaften her, würde eine Anwendung von Oktanol bessere Umwelteigenschaften als ein fossiler Kraftstoff aufweisen und die Handhabung wäre unkritisch. Die Energiedichte ist allerdings etwas geringer und eine 100%ige Drop-In-Fähigkeit mangels technischer Kompatibilität und Norm ist nicht gegeben.

### **Bereich leichte Nutzfahrzeuge (LNF)**

Die Bewertung der spezifischen Kraftstoffpfade für die Anwendung in leichten Nutzfahrzeugen (LNF) ist der Tabelle 5-6 zu entnehmen. Die Anwendung synthetischer Kraftstoffe in diesem Fahrzeugsegment wurde durch zwei Verbünde in drei Kraftstoffpfaden betrachtet. Im Pfad

C3Mobility\_#2 wird die Anwendung von reinem **DME** (Dimethylether) betrachtet, dessen Bewertung sich analog zur Bewertung des generischen Pfades ergibt. Im Pfad C3Mobility\_#4.1 war ursprünglich eine Mischung aus Butanol mit MtG-Benzin vorgesehen, allerdings wurden hierzu keine Angaben gemacht, weswegen auch keine Bewertung für reines Butanol erfolgte.

Die Bewertung für den Pfad CombiFuel\_#1.1, wo die Anwendung von **30 %<sub>vol</sub> Wasserstoff in Mischung mit Methan** untersucht wurde, erfolgt analog des entsprechenden generischen Pfades für Hythan. Dass hier der generische Pfad für die Anwendung im Pkw betrachtet wurde, hat hierbei keinen Einfluss auf die Bewertung. Die negative Bewertung der NO<sub>x</sub>-Emissionen geht auf Messungen aus dem Verbund CombiFuel im Vergleich mit CNG und Benzin zurück. Dabei wurde allerdings nicht betrachtet, ob sich die NO<sub>x</sub>-Emissionen evtl. wieder reduzieren lassen, vor allem mit Anpassungen in der Motorsteuerung.

**Tabelle 5-6:** Bewertung der Verbundpfade für die Kraftstoffnutzung im Bereich leichte Nutzfahrzeuge (LNF)

Kraftstoffpfad		C3Mobility_#2	C3Mobility_#4.1	CombiFuel_#1.1
		DME	Butanol	30 % <sub>vol</sub> H <sub>2</sub> + 70 % <sub>vol</sub> CH <sub>4</sub>
1) Umwelt-eigenschaften	CO	+2	k.A.	+3
	NO <sub>x</sub>	+1	k.A.	-3
	Ruß / Partikel (Anzahl, Masse)	+3	k.A.	+3
	unverbrannte KW (HC-Emission)	+3	k.A.	+3
	Schwefelverbindungen	+4	k.A.	+4
	CO <sub>2</sub> und H <sub>2</sub> O (Verbrauch)	0	k.A.	+2
	weitere Schadstoffe	-3	k.A.	-2
	<b>gesamt</b>	<b>+2</b>	<b>k.A.</b>	<b>+1</b>
2) Energie-inhalt	Energiedichte volumetrisch	-1	k.A.	-3
	Energiedichte gravimetrisch	-1	k.A.	+4
	Dichte (Stoffdichte)	-1	k.A.	-4
	<b>gesamt</b>	<b>-1</b>	<b>k.A.</b>	<b>-2</b>

Kraftstoffpfad		C3Mobility_#2	C3Mobility_#4.1	CombiFuel_#1.1
Kraftstoff		DME	Butanol	30 % <sub>vol</sub> H <sub>2</sub> + 70 % <sub>vol</sub> CH <sub>4</sub>
3) Sicherheit und Handhabung (inkl. Haltbarkeit und Lagerfähigkeit)	Siedepunkt / Siedebereich	-1	k.A.	-2
	Dampfdruck	-3	k.A.	n.a.
	Gefrierpunkt	+4	k.A.	n.a.
	Zündtemperatur	+2	k.A.	+4
	Zündgrenzen	-2	k.A.	-3
	Oktanzahl / Cetanzahl / Methanzahl (oben) + Wobbeindex (unten)	+1	k.A.	0 -2
	Flammpunkt	-4	k.A.	n.a.
	Hygroskopizität	0	k.A.	n.a.
	(Oxidations-) Stabilität	-1	k.A.	+2
	Diffusivität	n.a.	k.A.	-2
	Oberflächenspannung	0	k.A.	n.a.
	Dynamische Viskosität	0	k.A.	n.a.
	Kinematische Viskosität	0	k.A.	n.a.
	Gefahrenpotenzial bei unsachgemä- ßer Anwendung	-4	k.A.	-4
	<b>gesamt</b>	<b>-1</b>	<b>k.A.</b>	<b>-1</b>
4) Normen/ Regularien	REACH	+4	k.A.	0
	Normen	+2	k.A.	0
	Verordnungen	-2	k.A.	-1
	<b>gesamt</b>	<b>+1</b>	<b>k.A.</b>	<b>0</b>
5) Technik	Umrüstung	-2	k.A.	-4
	Materialverträglichkeit	-2	k.A.	0
	Drop-In-fähig	-4	k.A.	+1
	Anwendung bekannt / Erfahrung	-3	k.A.	+2
	<b>gesamt</b>	<b>-3</b>	<b>k.A.</b>	<b>-1</b>

### **Bereich schwere Nutzfahrzeuge (SNF)**

Die Bewertung der spezifischen Kraftstoffpfade für die Anwendung in schweren Nutzfahrzeugen (SNF) ist der Tabelle 5-7 zu entnehmen. Im Pfad C3Mobility\_#1.2 wird **Methanol** für die Anwendung in Lkw bzw. SNF betrachtet, daher erfolgt der Vergleich der technischen Kompatibilität mit einem Dieselmotorkraftstoff, welcher für dieses Fahrzeugsegment als Referenz dient. Dadurch ergibt sich hier für Methanol eine schlechtere Bewertung als im Pkw-Bereich (siehe dazu auch die Bewertung der generischen Methanolfade). In E2Fuels wurde die **Beimischung von 30 %<sub>vol</sub> OME** zu fossilem Diesel untersucht (Pfad E2Fuels\_#3.1), was zu einer Verbesserung der Umwelteigenschaften des Diesels führt, sich allerdings negativ auf Verbrauch und Kompatibilität auswirkt. Das Thema Materialverträglichkeit ist zwar auch noch Gegenstand der Forschung, jedoch zeigen bisherige Untersuchungen, dass bei einem Anteil von 30 % OME ein Austausch von bspw. Dichtungsmaterialien erforderlich sein wird. Auch gilt es für die Anwendung von OME als Kraftstoff noch einige regulative Fragestellungen zu klären (siehe dazu auch die Kraftstoffsteckbriefe aus dem Projekt NormAKraft [DECHEMA 2023]. Die Bewertung von **DME** des Pfades FLExDME\_#1 erfolgt ebenfalls analog des generischen DME-Pfades. Dass dieser für den LNF-Bereich definiert ist, bei FlexDME die Betrachtung allerdings für den SNF-Bereich erfolgt, hat hier keinen Einfluss auf die Bewertung.

Der Verbund SynLink hat unterschiedliche Dieselmotorkraftstoffe für die Anwendung im Schwerlastbereich betrachtet. Hinsichtlich der Umwelteigenschaften werden die Grenzwerte für regulierte Emissionen nach Verbundangaben eingehalten und teilweise deutlich unterschritten.

Im Pfad SynLink\_#1.1 wird eine **Mischung aus 20 % FT-Diesel und höheren Alkoholen mit 80 % fossilem Diesel** betrachtet, was zu leicht schlechteren Umwelteigenschaften führt, da die NO<sub>x</sub>-Emissionen immer noch ähnlich dem Referenzkraftstoff sind und durch den fossilen Anteil noch Schwefelverbindungen vorhanden sind. Des Weiteren liegen die vom Verbund angegebenen Eigenschaften teilweise außerhalb der Norm EN 590. Vor allem die Cetanzahl, welche mind. 51 betragen muss, wird nicht ganz erreicht. Den angegebenen CFPP- und CP-Werten zufolge, könnte dieser Dieselmotorkraftstoff ausschließlich in Sommermonaten eingesetzt werden. Schon bei leichten Minusgraden im Winter besteht hier die Möglichkeit der Ausflockung von Kraftstoffbestandteilen. Hinsichtlich der technischen Kompatibilität haben Motorentest und Fahrversuche Anwendbarkeit gezeigt. Informationen zu Langzeitverhalten und Materialverträglichkeit liegen allerdings nicht vor.

Im Pfad Syn-Link\_#1.2 wird ein **olefinreicher FT-Diesel** betrachtet, der in Fahrversuchen eine geringfügige Minderung der NO<sub>x</sub>-Emissionen zeigt. Ähnlich wie im Pfad SynLink\_#1.1 konnte dieser in Motorentests den konventionellen Diesel ersetzen. Die Dauerhaltbarkeit und Materialverträglichkeit, insbesondere mit Blick auf die olefinischen Bestandteile, müssen aber noch untersucht werden. Im Pfad SynLink\_#1.3 wird ein reiner **FT-Diesel** untersucht, mit welchem die NO<sub>x</sub>-Emissionen deutlich (um über 10 %) reduziert werden konnten. Beide vollsynthetischen Dieselmotorkraftstoffe der Pfade SynLink\_#1.2 und SynLink\_#1.3 erfüllen die Norm EN 15940 für paraffinischen Diesel. Die Norm EN 15940 ist jedoch nicht in der 10. BImSchV enthalten, weswegen diese synthetischen Dieselmotorkraftstoffe nur mit Sondergenehmigung bzw. einzelner Freigabe verwendet werden können.

**Tabelle 5-7:** Bewertung der Verbundpfade für die Kraftstoffnutzung im Bereich schwere Nutzfahrzeuge (SNF)

Kraftstoffpfad		C3Mobility_#1.2	E2Fuels_#3.1	FlexDME_#1	SynLink_#1.1	SynLink_#1.2	SynLink_#1.3
		Methanol	30 % <sub>vol</sub> OME+ 70 % <sub>vol</sub> fossiler Diesel	DME	20 % <sub>vol</sub> NT-FT-Diesel + 80 % <sub>vol</sub> fossiler Diesel	Diesel	Diesel
Kraftstoff							
1) Umwelt- eigenschaften	CO	+3	-1	+2	-3	-3	-3
	NO <sub>x</sub>	+1	+1	+1	-3	-2	0
	Ruß / Partikel (Anzahl, Masse)	+3	+1	+3	-1	-1	-1
	unverbrannte KW (HC-Emission)	+3	+1	+3	-1	-1	-1
	Schwefelverbindungen	+4	+1	+4	+2	+4	+4
	CO <sub>2</sub> und H <sub>2</sub> O (Verbrauch)	-1	+1	0	+3	+3	+3
	weitere Schadstoffe	-3	-1	-3	0	0	0
	<b>gesamt</b>	<b>+2</b>	<b>0</b>	<b>+2</b>	<b>-1</b>	<b>0</b>	<b>0</b>
2) Energie- inhalt	Energiedichte volumetrisch	-2	+1	-1	+2	+2	+2
	Energiedichte gravimetrisch	-2	+1	-1	+3	+3	+3
	Dichte (Stoffdichte)	+1	+3	-1	+2	+2	+2
	<b>gesamt</b>	<b>-1</b>	<b>+2</b>	<b>-1</b>	<b>+2</b>	<b>+2</b>	<b>+2</b>
3) Sicherheit und Handhabung (inkl. Haltbarkeit und Lagerfähigkeit)	Siedepunkt / Siedebereich	+2	+1	-1	+1	+1	+1
	Dampfdruck	-1	+1	-3	+1	+1	+1
	Gefrierpunkt	+4	+1	+4	-1	+1	+1
	Zündtemperatur	+4	+2	+2	+2	+2	+2
	Zündgrenzen	-2	+2	-2	+2	+2	+2
	Oktanzahl / Cetanzahl / Methanzahl (oben) + Wobbeindex (unten)	-4	+2	+1	-1	+1	+1
	Flammpunkt	-3	+3	-4	+2	+2	+2
	Hygroskopizität	-3	0	0	0	0	0
	(Oxidations-) Stabilität	-1	+2	-1	+2	+2	+2
	Diffusivität	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.

Kraftstoffpfad		C3Mobility_#1.2	E2Fuels_#3.1	FlexDME_#1	SynLink_#1.1	SynLink_#1.2	SynLink_#1.3
Kraftstoff		Methanol	30 % <sub>vol</sub> OME+ 70 % <sub>vol</sub> fossiler Diesel	DME	20 % <sub>vol</sub> NT-FT-Diesel + 80 % <sub>vol</sub> fossiler Diesel	Diesel	Diesel
	Oberflächenspannung	0	0	0	0	0	0
	Dynamische Viskosität	0	0	0	0	0	0
	Kinematische Viskosität	0	0	0	0	0	0
	Gefahrenpotenzial bei unsachgemäßer Anwendung	-3	-1	-4	-1	-1	-1
	<b>gesamt</b>	<b>-1</b>	<b>+1</b>	<b>-1</b>	<b>0</b>	<b>+1</b>	<b>+1</b>
4) Normen/ Regularien	REACH	+4	-2	+4	+4	+4	+4
	Normen	-4	-1	+2	+2	+4	+4
	Verordnungen	-2	-4	-2	+4	-2	-2
	<b>gesamt</b>	<b>-3</b>	<b>-2</b>	<b>+1</b>	<b>+3</b>	<b>+3</b>	<b>+3</b>
5) Technik	Umrüstung	-4	0	-2	+4	+4	+4
	Materialverträglichkeit	0	-2	-2	+2	+2	+3
	Drop-In-fähig	-3	+2	-4	+2	+2	+3
	Anwendung bekannt / Erfahrung	-2	-3	-3	+1	+1	+3
	<b>gesamt</b>	<b>-3</b>	<b>-1</b>	<b>-3</b>	<b>+2</b>	<b>+2</b>	<b>+3</b>

### Bereich Schifffahrt

Die Bewertung der spezifischen Kraftstoffpfade für die Anwendung in der Schifffahrt ist der Tabelle 5-8 zu entnehmen. Innerhalb der Verbundpfade C3Mobility\_#1.1, E2Fuels\_#2.1 und SynLink\_#1.1 wird **Methanol** als Reinkraftstoff betrachtet, die Bewertung entspricht hier der Bewertung des generischen Pfades. Auch die Bewertung der Pfade E2Fuels\_#2.1 und MethQuest\_#5, in welchen **synthetisches LNG** beforscht wurde, erfolgt analog des generischen Pfades.

**Tabelle 5-8:** Bewertung der Verbundpfade für die Kraftstoffnutzung im Bereich Schifffahrt

Kraftstoffpfad		C3Mobility_#1.1	E2Fuels_#1.1	E2Fuels_#2.1	ISystem4EFuel_#1.1	ISystem4EFuel_#2.1	MethQuest_#5	PlasmaFuel_#1	SynLink_#2.1
		Methanol	LNG	Methanol	30 % <sub>vol</sub> OME + 70 % <sub>vol</sub> fossiler Diesel	30 % <sub>vol</sub> HVO + 70 % <sub>vol</sub> fossiler Diesel	LNG	Diesel	Methanol
1) Umwelt- eigenschaften	CO	+3	+2	+3	-1	-3	+2	-3	+3
	NO <sub>x</sub>	+1	+1	+1	+1	-2	+1	-1	+1
	Ruß / Partikel (Anzahl, Masse)	+3	+2	+3	+1	-2	+2	-1	+3
	unverbrannte KW (HC-Emission)	+3	0	+3	+1	-1	0	-1	+3
	Schwefelverbindungen	+4	+4	+4	+1	0	+4	+4	+4
	CO <sub>2</sub> und H <sub>2</sub> O (Verbrauch)	-1	+1	-1	+1	+3	+1	+3	-1
	weitere Schadstoffe	-3	-4	-3	-1	0	-4	0	-3
	<b>gesamt</b>	<b>+2</b>	<b>+1</b>	<b>+2</b>	<b>0</b>	<b>-1</b>	<b>+1</b>	<b>0</b>	<b>+2</b>
2) Energie- inhalt	Energiedichte volumetrisch	-2	0	-2	+1	+3	0	+2	-2
	Energiedichte gravimetrisch	-2	+4	-2	+1	+3	+4	+3	-2
	Dichte (Stoffdichte)	+1	-3	+1	+3	+2	-3	+2	+1
	<b>gesamt</b>	<b>-1</b>	<b>0</b>	<b>-1</b>	<b>+2</b>	<b>+3</b>	<b>0</b>	<b>+2</b>	<b>-1</b>
3) Sicherheit und Handhabung (inkl. Haltbarkeit und Lagerfähig- keit)	Siedepunkt / Siedebereich	+2	-4	+2	+1	+1	-4	+1	+2
	Dampfdruck	-1	n.a.	-1	+1	+1	n.a.	+1	-1
	Gefrierpunkt	+4	n.a.	+4	+1	+1	n.a.	+1	+4
	Zündtemperatur	+4	+4	+4	+2	+2	+4	+2	+4
	Zündgrenzen	-2	-1	-2	+2	+2	-1	+2	-2
	Oktanzahl / Cetanzahl / Methanzahl (oben) + Wobbeindex (unten)	-4	0 0	-4	+2	0	0 0	0	-4
	Flammpunkt	-3	n.a.	-3	+3	+2	n.a.	+2	-3
	Hygroskopizität	-3	n.a.	-3	0	0	n.a.	0	-3
	(Oxidations-) Stabilität	-1	+2	-1	+2	+2	+2	+2	-1
	Diffusivität	n.a.	0	n.a.	n.a.	n.a.	0	n.a.	n.a.



Kraftstoffpfad		Kraftstoff							
		C3Mobility_#1.1	E2Fuels_#1.1	E2Fuels_#2.1	ISystem4EFuel_#1.1	ISystem4EFuel_#2.1	MethQuest_#5	PlasmaFuel_#1	SynLink_#2.1
Kraftstoff		Methanol	LNG	Methanol	30 % <sub>vol</sub> OME + 70 % <sub>vol</sub> fossiler Diesel	30 % <sub>vol</sub> HVO + 70 % <sub>vol</sub> fossiler Diesel	LNG	Diesel	Methanol
	Oberflächenspannung	0	n.a.	0	0	0	n.a.	0	0
	Dynamische Viskosität	0	n.a.	0	0	0	n.a.	0	0
	Kinematische Viskosität	0	n.a.	0	0	0	n.a.	0	0
	Gefahrenpotenzial bei unsachgemä- ßer Anwendung	-3	-4	-3	-1	-1	-4	-1	-3
	<b>gesamt</b>	<b>-1</b>	<b>-1</b>	<b>-1</b>	<b>+1</b>	<b>+1</b>	<b>-1</b>	<b>+1</b>	<b>-1</b>
4) Normen/ Regularien	REACH	+4	+4	+4	-2	+4	+4	+4	+4
	Normen	+1	+4	+1	-1	+4	+4	+4	+1
	Verordnungen	0	+2	0	-4	0	+2	0	0
	<b>gesamt</b>	<b>+1</b>	<b>+4</b>	<b>+1</b>	<b>-2</b>	<b>+3</b>	<b>+4</b>	<b>+3</b>	<b>+1</b>
5) Technik	Umrüstung	-3	-3	-3	+1	+3	-3	+3	-3
	Materialverträglichkeit	0	+4	0	-2	+4	+4	+4	0
	Drop-In-fähig	+2	+4	+2	+2	+3	+4	+4	+2
	Anwendung bekannt / Erfahrung	+3	+4	+3	-3	+3	+4	+4	+3
	<b>gesamt</b>	<b>0</b>	<b>+1</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>+3</b>	<b>+1</b>	<b>+4</b>	<b>0</b>

Die Bewertungen der **synthetischen Dieselkraftstoffe** der Pfade ISystem4EFuel\_#2.1 und PlasmaFuel\_#1 entsprechen weitestgehend dem generischen Dieselpfad. Im Pfad ISystem4EFuel\_#2.1 handelt es sich allerdings um eine Mischung aus 30 %<sub>vol</sub> HVO und 70 %<sub>vol</sub> fossilem Diesel, was zu einer etwas schlechteren Bewertung der Umwelteigenschaften führt. Da der Verbund in seinen Untersuchungen mit einem solchen Dieselkraftstoff gearbeitet hat, der dem Automobil-Diesel nach EN 590 entspricht, kann obwohl es sich um eine Mischung handelt, nicht von einer vollständigen Kompatibilität ausgegangen werden. Die Bewertung der technischen Kompatibilität entspricht hier daher der Bewertung des generischen, synthetischen Dieselkraftstoffes. Im Verbund „PlasmaFuel“ wurde hingegen ein solcher Dieselkraftstoff untersucht, der mit einer größeren C-Atomzahl designiert wurde (im Durchschnitt C<sub>20</sub>), so dass dieser dem konventionellem Schiffsdiesel deutlich ähnlicher ist und daher hinsichtlich der technischen Kompatibilität besser als der generische Diesel bewertet wird.

Im Pfad ISystem4EFuel\_#1.1 wird die **Zumischung von 30 %<sub>Vol</sub> OME** zu fossilem Diesel betrachtet. Im Vergleich zur Zumischung von HVO oder auch der Anwendung von einem reinen paraffinischen Diesel können die Umwelteigenschaften dadurch deutlich verbessert werden – die Rußbildung ist deutlich vermindert, wodurch NO<sub>x</sub>-Emissionen effektiver aus dem Abgas entfernt werden können. Bei einem so hohen OME-Anteil ist die Kompatibilität sowohl hinsichtlich des technischen Bereiches, als auch der Regularien, nicht mehr uneingeschränkt gegeben.

### **Bereich Luftfahrt**

Die Bewertung der spezifischen Kraftstoffpfade für die Anwendung in der Luftfahrt ist in Tabelle 5-9 gezeigt. Betrachtet werden hier jeweils Mischungen aus **50 %<sub>Vol</sub> des synthetischen Kerosins** mit fossilem Kerosin. Das FT-Kerosin aus dem Pfad PowerFuel\_#1.1 entspricht dabei dem generischen FT-Kerosin-Pfad, weswegen die Bewertung hier identisch ist. Auch die anderen beiden Kerosin-Pfade sind hinsichtlich der Umwelteigenschaften, dem Energieinhalt sowie der Sicherheit und Handhabung identisch mit dem generischen Pfad.

Beim Pfad PowerFuel\_#2.1 handelt es sich um eine alternative Route des FT-Verfahrens, welche nach ASTM D7566 nicht zugelassen ist. Allerdings werden keine Gründe gesehen, die gegen eine Erweiterung des ASTM-Standards sprechen, weswegen der Bereich Normen mit +2 bewertet wird. Da nicht bekannt ist, ob die Zusammensetzung des alternativen FT-Kerosins evtl. von dem des „bekannten“ abweicht, wurde hier bei „Anwendung bekannt / Erfahrung“ ein Punkt abgezogen.

Bei dem Kerosin des Pfades KEROSyN100\_#1 handelt es sich um Methanol-to-Jet (MtJ). Da dieses hinsichtlich seiner Zusammensetzung und Molekülstruktur ähnlich dem zertifizierten AtJ-SPK ist, gibt es bei der technischen Kompatibilität nur im Bereich „Anwendung bekannt / Erfahrung“ mit +2 eine abweichende Bewertung im Vergleich zum zertifizierten Treibstoff, da die Zusammensetzung nicht mit dem AtJ-SPK identisch ist und die Unterschiede hier größer sind als bei den beiden FT-Kerosinen des Verbundes PowerFuel. Im Bereich der Normen und Regularien muss noch geklärt werden, ob bzw. inwieweit das MtJ in diejenigen für AtJ-SPK integrierbar ist. In der ASTM D7566 ist für AtJ-SPK bislang festgeschrieben, aus welchen Alkoholen die Herstellung erfolgen muss. Wenn eine Erweiterung hinsichtlich der erlaubten Ausgangsstoffe erfolgen könnte, wäre ein verkürztes Zulassungsverfahren im Bereich des Möglichen. Auch gibt es für MtJ selbst bislang keine REACH-Registrierung, alkoholbasiertes Kerosin hingegen ist eingetragen, allerdings ohne, dass dabei die erlaubten Ausgangsstoffe spezifiziert sind. Es müsste also mindestens geprüft werden, ob mit dieser REACH-Registrierung auch das MtJ abgedeckt ist.

**Tabelle 5-9:** Bewertung der Verbundpfade für die Kraftstoffnutzung im Bereich Luftfahrt

Kraftstoffpfad		KEROSyN100_#1	PowerFuel_#1.1	PowerFuel_#2.1
Kraftstoff		Kerosin	Kerosin	Kerosin
1) Umwelt- eigenschaften	CO	-3	-3	-3
	NO <sub>x</sub>	-3	-3	-3
	Ruß / Partikel (Anzahl, Masse)	-2	-2	-2
	unverbrannte KW (HC-Emission)	-2	-2	-2
	Schwefelverbindungen	-1	-1	-1
	CO <sub>2</sub> und H <sub>2</sub> O (Verbrauch)	+3	+3	+3
	weitere Schadstoffe	0	0	0
	<b>gesamt</b>	<b>-2</b>	<b>-2</b>	<b>-2</b>
2) Energie- inhalt	Energiedichte volumetrisch	+3	+3	+3
	Energiedichte gravimetrisch	+3	+3	+3
	Dichte (Stoffdichte)	+2	+2	+2
	<b>gesamt</b>	<b>+3</b>	<b>+3</b>	<b>+3</b>
3) Sicherheit und Handhabung (inkl. Haltbarkeit und Lagerfähigkeit)	Siedepunkt / Siedebereich	+1	+1	+1
	Dampfdruck	+1	+1	+1
	Gefrierpunkt	+3	+3	+3
	Zündtemperatur	+2	+2	+2
	Zündgrenzen	+2	+2	+2
	Oktanzahl / Cetanzahl / Methanzahl (oben) + Wob- beindex (unten)	0	0	0
	Flammpunkt	0	0	0
	Hygroskopizität	+1	+1	+1
	(Oxidations-) Stabilität	+3	+3	+3
	Diffusivität	n.a.	n.a.	n.a.
	Oberflächenspannung	0	0	0
	Dynamische Viskosität	0	0	0
	Kinematische Viskosität	0	0	0
	Gefahrenpotenzial bei unsachgemäßer Anwendung	-1	-1	-1
<b>gesamt</b>	<b>+1</b>	<b>+1</b>	<b>+1</b>	

Kraftstoffpfad		KEROSyN100_#1	PowerFuel_#1.1	PowerFuel_#2.1
Kraftstoff		Kerosin	Kerosin	Kerosin
4) Normen/ Regularien	REACH	+2	+4	+4
	Normen	0	+4	+2
	Verordnungen	+4	+4	+4
	<b>gesamt</b>	<b>+1</b>	<b>+4</b>	<b>+3</b>
5) Technik	Umrüstung	+4	+4	+4
	Materialverträglichkeit	+4	+4	+4
	Drop-In-fähig	+4	+4	+4
	Anwendung bekannt / Erfahrung	+2	+4	+3
	<b>gesamt</b>	<b>+4</b>	<b>+4</b>	<b>+4</b>

### Bereich Rückverstromung

Neben der Nutzung von synthetischen Kraftstoffen für den Verkehr haben sich drei Verbünde auch mit der Anwendung für die Energiegewinnung befasst. Die Bewertung der spezifischen Kraftstoffpfade für die Rückverstromung ist der Tabelle 5-10 zu entnehmen. Im Pfad MethQuest\_#4 wird **synthetisches Methan** bzw. CNG betrachtet, dessen Bewertung analog zum generischen Methan durchgeführt wurde. In dem Verbund MethPower – ein Teilprojekt innerhalb des Gesamtprojekts MethQuest – wurde neben der Rückverstromung von Methan auch die Anwendung von Wasserstoff in Blockheizkraftwerken untersucht, welche hier perspektivisch als vielversprechende Einsatzmöglichkeit identifiziert wurde.

Im Rahmen der Kraftstoffpfade E2Fuels\_#4 und LeanStoichH2\_#1 wurden **Mischungen von synthetischem CNG mit Wasserstoff (H<sub>2</sub>)** beforscht. Im Verbund E2Fuels\_#4 beträgt der Anteil an H<sub>2</sub> 25 %<sub>Vol</sub>, ist also ähnlich der generischen Mischung (Hythan mit 30 %<sub>Vol</sub> H<sub>2</sub>). Der Verbund LeanStoichH2 hat die Anwendung von Mischungen mit bis zu 20 %<sub>w</sub> H<sub>2</sub> untersucht, was einem volumetrischen Anteil von etwa 67 %<sub>Vol</sub> H<sub>2</sub> entspricht.

**Tabelle 5-10:** Bewertung der Verbundpfade für die Brennstoffnutzung in der Rückverstromung

Kraftstoffpfad		E2Fuels_#4	LeanStoicH2_#1	MethQuest_#4
Kraftstoff		25 % <sub>vol</sub> H <sub>2</sub> + 75 % <sub>vol</sub> CH <sub>4</sub>	67 % <sub>vol</sub> H <sub>2</sub> + 33 % <sub>vol</sub> CH <sub>4</sub>	CNG
1) Umwelteigenschaften	CO	+3	+3	+2
	NO <sub>x</sub>	-3	-3	-2
	Ruß / Partikel (Anzahl, Masse)	+3	+4	+2
	unverbrannte KW (HC-Emission)	+3	+4	+2
	Schwefelverbindungen	+4	+4	+4
	CO <sub>2</sub> und H <sub>2</sub> O (Verbrauch)	+2	+2	+1
	weitere Schadstoffe	-2	-2	-4
	<b>gesamt</b>	<b>+1</b>	<b>+2</b>	<b>+1</b>
2) Energieinhalt	Energiedichte volumetrisch	-3	-3	-3
	Energiedichte gravimetrisch	+4	+4	+4
	Dichte (Stoffdichte)	-4	-4	-3
	<b>gesamt</b>	<b>-2</b>	<b>-2</b>	<b>-2</b>
3) Sicherheit und Handhabung (inkl. Haltbarkeit und Lagerfähigkeit)	Siedepunkt / Siedebereich	-2	-2	-2
	Dampfdruck	n.a.	n.a.	n.a.
	Gefrierpunkt	n.a.	n.a.	n.a.
	Zündtemperatur	+4	+4	+4
	Zündgrenzen	-3	-3	-1
	Oktanzahl / Cetanzahl / Methanzahl (oben) + Wobbeindex (unten)	0	0	0
	Flammpunkt	n.a.	n.a.	n.a.
	Hygroskopizität	n.a.	n.a.	n.a.
	(Oxidations-) Stabilität	+2	+2	+2
	Diffusivität	-2	-3	0
	Oberflächenspannung	n.a.	n.a.	n.a.
	Dynamische Viskosität	n.a.	n.a.	n.a.
	Kinematische Viskosität	n.a.	n.a.	n.a.
Gefahrenpotenzial bei unsachgemäßer Anwendung	-4	-4	-4	

Kraftstoffpfad		E2Fuels_#4	LeanStoichH2_#1	MethQuest_#4
Kraftstoff		25 % <sub>vol</sub> H <sub>2</sub> + 75 % <sub>vol</sub> CH <sub>4</sub>	67 % <sub>vol</sub> H <sub>2</sub> + 33 % <sub>vol</sub> CH <sub>4</sub>	CNG
	<b>gesamt</b>	<b>-1</b>	<b>-1</b>	<b>-1</b>
4) Normen/ Regularien	REACH	0	0	+4
	Normen	+1	0	+4
	Verordnungen	+2	+2	+2
	<b>gesamt</b>	<b>+1</b>	<b>0</b>	<b>+4</b>
5) Technik	Umrüstung	+2	+2	+4
	Materialverträglichkeit	0	-1	+4
	Drop-In-fähig	+2	+1	+4
	Anwendung bekannt / Erfahrung	+2	0	+4
	<b>gesamt</b>	<b>+2</b>	<b>+1</b>	<b>+4</b>

Die Bewertung der Kriterien Umwelteigenschaften, Energieinhalt sowie Sicherheit und Handhabung orientiert sich hierbei an der Bewertung des generischen Pfades für Hythan, da die hier bewerteten Eigenschaften unabhängig vom betrachteten Bereich sind. Aufgrund des höheren Wasserstoffanteils beim Verbund LeanStoichH2 ergibt sich eine bessere Bewertung als für den generischen Fall, da C-haltige Emissionen weitestgehend auf ein Minimum reduziert werden können. Hinsichtlich der regulativen Aspekte bestehen für die Nutzung in Kraftwerken noch einige Unklarheiten: Für Methan-Wasserstoff-Mischungen gibt bislang keine REACH-Registrierung (für Methan hingegen schon) und außerhalb der EN 16723 auch keine eigenständige Norm. Laut der EN 16723 ist eine Anwendung von bis zu 10 %<sub>vol</sub> in Gasmotoren möglich. Hier ist es denkbar, die Norm entsprechend für Nutzung höherer Wasserstoffanteile in Kraftwerken zu erweitern. Bei der Bewertung wurde berücksichtigt, dass im Verbund LeanStoichH2 ein Wasserstoffanteil von 20 %<sub>w</sub> (etwa 67 %<sub>vol</sub>) betrachtet wird (daher 0 statt +1). Für die Nutzung von Brennstoffen in mittelgroßen Feuerungs-, Gasturbinen und Verbrennungsmotoranlagen von 1 MW bis 50 MW gilt die 44. BImSchV. Der Betrieb größerer Anlagen ist in der 13. BImSchV geregelt. Daneben gibt es die TA Luft (Technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft). In keiner der Regelwerke werden Angaben zur Brennstoffzusammensetzung gemacht. Es ist lediglich vorgeschrieben, dass ein Nachweis zur Einhaltung der Emissionsgrenzwerte zu erbringen ist, welcher teilweise auch brennstoffspezifisch ist. Dies gilt aber gleichermaßen für alle Brennstoffe, ungeachtet ihrer Herkunft oder Zusammensetzung. Daher ergibt sich analog zum synthetischen CNG für die Bewertung der „Verordnungen“ ebenfalls eine +2.

Hinsichtlich der technischen Kompatibilität ist eine Integration in bestehende Kraftwerke einfacher umsetzbar als dies bei der Anwendung im Straßenverkehr der Fall wäre. Ab 30 %<sub>vol</sub> H<sub>2</sub>

sind konstruktive Änderungen notwendig, aufgrund anderer Anforderungen an den Explosionsschutz, sowie Anpassungen des Zündsystems erforderlich. Laut Aussage des Verbundes LeanStoichH<sub>2</sub>, sind je nach Art der Gemischbildung notwendige Umrüstungen mit einem überschaubaren Aufwand verbunden, sodass es hier keinen Unterschied zu Mischungen mit max. 30 %<sub>vol</sub> H<sub>2</sub> gibt. Die Drop-In-Fähigkeit ist dadurch allerdings etwas vermindert (+1 statt +2). Im Bereich der Materialverträglichkeit gibt es noch Forschungsthemen bzgl. der Problematik der Wasserstoffversprödung und höherer Verbrennungstemperaturen. Im Bereich „Anwendung bekannt / Erfahrung“ ergibt sich noch ein Unterschied, da im Verbund LeanStoichH<sub>2</sub> auch eine neue Art der Gemischbildung untersucht wird, welche sich noch im Status der Entwicklung befindet und daher auch ein niedrigeres TRL-Level aufweist, als dies bei bereits bekannten Systemen der Fall ist.

## 5.4 Integration ins Verkehrssystem: Straße

### Bereich Pkw

Die Bewertung der von den Verbänden betrachteten synthetischen Kraftstoffe im Bereich Pkw sind in Tabelle 5-11 dargestellt. Insgesamt konnten neun Pfade der Priorität 1 bewertet werden. Aufgrund von teilweise unvollständigen Messreihen sowie fehlenden Angaben im Fragebogen, musste zum Teil auf generische Werte für Eingangsgrößen, wie Kraftstoffgestehungskosten, Anschaffungskosten und Kraftstoffverbrauch, zurückgegriffen werden.

**Tabelle 5-11** Bewertungsübersicht verbundspezifische Pfade hinsichtlich der Integration ins Verkehrssystem: Bereich Pkw (exkl. MWSt und EnergieSt)

Kraftstoffpfad		C3Mobility_#3.1	MEEMO_#1	MethQuest_#1	NAMOSYN_#1.1	NAMOSYN_#2.1	NAMOSYN_#2.2	SolareKraftstoffe_#1	SolareKraftstoffe_#2	SynLink_#2.2
		MtG Benzin	Methanol	Methan	OME	65 Vol-% DMC + 35 Vol-% MeFo	15 Vol-% MeFo + 85 Vol-% Methanol	Benzin	Benzin	Methanol
Kosten der Fahrzeughaltung	Anschaffungskosten	+4	+4	+1	k.A.	k.A.	k.A.	+4	+4	+4
	Kraftstoffkosten	-3	-3	-4	-4	0	k.A.	n.a.	n.a.	k.A.
	Fahrzeug- und Kraftstoffkosten	-3	-3	-4	k.A.	k.A.	k.A.	n.a.	n.a.	k.A.
	<b>gesamt</b>	<b>-3</b>	<b>-3</b>	<b>-4</b>	<b>k.A.</b>	<b>k.A.</b>	<b>k.A.</b>	<b>n.a.</b>	<b>n.a.</b>	<b>k.A.</b>
Tankvorgang	Betankungszeit	+4	+4	+3	+4	+4	k.A.	+4	+4	k.A.
	Reichweite pro Tankvorgang	+4	0	+2	0	+3	k.A.	+4	+4	k.A.
	<b>gesamt</b>	<b>+4</b>	<b>+2</b>	<b>+3</b>	<b>+2</b>	<b>+4</b>	<b>k.A.</b>	<b>+4</b>	<b>+4</b>	<b>k.A.</b>
Tankinfrastruktur	Tankstellenverfügbarkeit	+4	-4	0	-4	-4	-4	+4	+4	-4
	Investitionsaufwand für ausreichende Tankstellenabdeckung	+4	0	-2	0	0	0	+4	+4	0
	<b>gesamt</b>	<b>+4</b>	<b>-2</b>	<b>-1</b>	<b>-2</b>	<b>-2</b>	<b>-2</b>	<b>+4</b>	<b>+4</b>	<b>-2</b>

Bei den verbundspezifischen Pfaden spiegelt sich das gleiche Ergebnis wie bei den in Kapitel 4 bewerteten generischen Pfaden. Der drop-in-fähige MtG-Pfad schließt aufgrund der Vorteile bei der Reichweite und der aktuellen Infrastrukturverfügbarkeit, im Vergleich zu den anderen betrachteten Kraftstoffen, mit der besten Bewertung ab.

Bei den Verbänden C3Mobility, MEEMO, NAMOSYN und SynLink wurden keine Informationen zu Anschaffungskosten, Kraftstoffkosten und Kraftstoffverbrauch im Fragebogen angegeben. Daher wurde hier, sofern möglich, mit generischen Werten gearbeitet. Im Falle der OME-,



DMC/MeFo- bzw. MeFo-Pfade fehlt allerdings der generische Wert für die Anschaffungskosten. Daher ist die Bewertung dieser NAMOSYN-Pfade unvollständig. Im Falle von SynLink konnte nicht auf generische Kraftstoffverbräuche zurückgegriffen werden, weil der Verbund die Verwendung von Methanol im Dieselmotor untersucht und BEniVer hier bislang keine Daten für den Kraftstoffverbrauch vorlagen.

Beim Verbund SolareKraftstoffe wurde zwar der Kraftstoffverbrauch, allerdings keine Kraftstoffkosten angegeben. Die Herstellung basiert auf der Nutzung der Sonnenenergie in einem Solarturm und unterscheidet sich dadurch von den anderen Verfahren. Daher sind die Kosten nicht mit den anderen Herstellungsrouten vergleichbar und es wurde darauf verzichtet, die generischen Kraftstoffkosten von Benzin für die Bewertung anzunehmen.

### Bereich leichte Nutzfahrzeuge

**Tabelle 5-12:** Bewertungsübersicht verbundspezifische Pfade hinsichtlich der Integration ins Verkehrssystem: Bereich LNF (exkl. MWSt und EnergieSt)

Kraftstoffpfad		C3Mobility_#2	CombiFuel_#1.1
		DME	Hythan
Kosten der Fahrzeughaltung	Anschaffungskosten	+1	0
	Kraftstoffkosten	-2	-2
	Fahrzeug- und Kraftstoffkosten	-2	-2
	<b>gesamt</b>	<b>-2</b>	<b>-2</b>
Tankvorgang	Betankungszeit	+4	+2
	Reichweite pro Tankvorgang	0	+1
	<b>gesamt</b>	<b>+2</b>	<b>+2</b>
Tankinfrastruktur	Tankstellenverfügbarkeit	-4	-4
	Investitionsaufwand für ausreichende Tankstellenabdeckung	0	-4
	<b>gesamt</b>	<b>-2</b>	<b>-4</b>

Die Bewertung der von den Verbänden betrachteten, synthetischen Kraftstoffe im Bereich LNF sind in Tabelle 5-12 dargestellt. Insgesamt konnten zwei Pfade der Priorität 1 bewertet werden. Beim Verbund C3Mobility wurden keine Informationen zu Anschaffungskosten, Kraftstoffkosten und Kraftstoffverbrauch im Fragebogen angegeben. Daher wurde hier mit generischen Werten gearbeitet. Beim Verbund CombiFuel wurden zwar der Kraftstoffverbrauch, nicht aber die Kraftstoffkosten angegeben, daher werden generische Kraftstoffkosten angenommen.

### Bereich schwere Nutzfahrzeuge

Die Bewertung der von den Verbänden betrachteten, synthetischen Kraftstoffe im Bereich SNF sind in Tabelle 5-13 dargestellt. Insgesamt konnten sechs Pfade der Priorität 1 bewertet werden.

Bei den Verbänden C3Mobility, E2Fuels und FlexDME wurden keine Informationen zu Anschaffungskosten, Kraftstoffkosten und Kraftstoffverbrauch im Fragebogen angegeben. Daher wurde hier, sofern möglich, mit generischen Werten gearbeitet. Im Falle des OME-Kraftstoffpfades fehlt allerdings der generische Wert für die Anschaffungskosten. Daher ist die Bewertung des E2Fuels-Pfades unvollständig. Beim SynLink-Pfad 1.1 wurde zwar der Kraftstoffverbrauch, allerdings keine Kraftstoffkosten angegeben. Daher wurden hier die generischen Kraftstoffkosten von Diesel angenommen.

**Tabelle 5-13:** Bewertungsübersicht verbundspezifischer Pfade hinsichtlich der Integration ins Verkehrssystem: Bereich SNF (exkl. MWSt und EnergieSt)

Kraftstoffpfad		C3Mobility_#1.2	E2Fuels_#3.1	FlexDME_#1	SynLink_#1.1	SynLink_#1.2	SynLink_#1.3
Kraftstoff		Methanol	OME	DME	20% NT-FT-Diesel + 80% fossiler Diesel	Diesel	Diesel
Kosten der Fahrzeughaltung	Anschaffungskosten	+4	k.A.	+3	+4	+4	+4
	Kraftstoffkosten	-3	-4	-3	0	-4	-4
	Fahrzeug- und Kraftstoffkosten	-2	k.A.	-3	0	-4	-3
	<b>gesamt</b>	<b>-2</b>	<b>k.A.</b>	<b>-3</b>	<b>0</b>	<b>-4</b>	<b>-3</b>
Tankvorgang	Betankungszeit	+4	+4	+4	+4	+4	+4
	Reichweite pro Tankvorgang	-2	-1	-1	+3	+3	+4
	<b>gesamt</b>	<b>+1</b>	<b>+2</b>	<b>+2</b>	<b>+4</b>	<b>+4</b>	<b>+4</b>
Tankinfrastruktur	Tankstellenverfügbarkeit	-4	-4	-4	+4	0	0
	Investitionsaufwand für ausreichende Tankstellenabdeckung	+3	+3	+3	+4	+4	+4
	<b>gesamt</b>	<b>-1</b>	<b>-1</b>	<b>-1</b>	<b>+4</b>	<b>+2</b>	<b>+2</b>

### **Bereich Schifffahrt**

Für den Bereich der Kosten erfolgt die Bewertung überwiegend analog der generischen Pfade. Einzig bei den Kraftstoffen des Verbundes ISystem4EFuel müssen die unterschiedlichen Mischungen berücksichtigt werden. Bzgl. der Anschaffungskosten wird angenommen, dass die Anwendung in einem Dieselmotor erfolgt (ggf. notwendige Umrüstungen fließen bereits bei der Bewertung der Nutzung (siehe 5.3) ein), sodass hier die Bewertung analog eines reinen Dieselmotorkraftstoffes erfolgt. Für die Kraftstoffkosten des Pfades ISystem4EFuel\_#1.1, wo es sich um eine 30%-Mischung mit fossilem Diesel handelt, werden zunächst die Gestehungskosten des generischen DMEs (1,82 €/kg) und der Verbrauch für Diesel (65 kg/km) herangezogen. Unter der Berücksichtigung, dass es sich um eine Mischung mit fossilem Diesel handelt, würden sich die Kosten auf 61,44 €/km belaufen. OMEs sind in der Herstellung allerdings teurer als DME, zudem ist der Verbrauch durch den Zusatz der oxygenierten Komponente höher, sodass angenommen wird, dass die Kosten nochmals um 30-50 % höher ausfallen, wodurch sich hier eine Bewertung von +1 ergibt. Für den Pfad ISystem4EFuel\_#2.1 werden 0,85 €/kg als Kraftstoffkosten für HVO angenommen. Da der Verbrauch ähnlich dem fossilen Diesel sein sollte, ergeben sich für die 30 %-Mischung HVO + fossiler Diesel 42,52 €/km. Da die Kostenskala aufgrund der rein synthetischen Kraftstoffe bis 232,32 €/km reicht (siehe 4.4), ist dieser Pfad hier mit +3 bewertet.

Für den Bereich des Tankvorgangs gilt für die Betankungsdauer die gleiche Aussage wie für die generischen Pfade, die Zusammensetzung und Beschaffenheit hat hier keinen Einfluss im Vergleich zu den konventionellen Kraftstoffen. Die Bewertung der Reichweite erfolgt analog der generischen Pfade und unter Berücksichtigung der Bewertung des Verbrauchs aus der Kraftstoffnutzung (siehe 5.3).

Auch die Kriterien der Tankstellenverfügbarkeit und -abdeckung sind, abgesehen von den Kraftstoffmischungen aus ISystem4EFuel, analog der generischen Pfade bewertet. Für die HVO-Mischung des Pfades ISystem4EFuel\_#2.1 gilt zwar, dass hier die bestehende Infrastruktur genutzt werden kann, jedoch ist eine Vermischung aufgrund der etwas höheren Kosten evtl. nicht überall gewollt, sodass der Pfad mit +3 bewertet wurde. Für die Anwendung der Mischung aus Diesel und OME stellt sich die Frage, wo die Mischung erfolgen soll (in der Raffinerie, im Tanklager am Hafen oder auf dem Schiff)? Da es bei hohen OME-Anteilen Probleme mit der Materialverträglichkeit gibt, kann die bestehende Infrastruktur (noch) nicht oder nur zum Teil genutzt werden. Der Aufwand für eine ausreichende Abdeckung ist hier allerdings auch schwer abschätzbar.

**Tabelle 5-14:** Bewertung der Referenzpfade für die Schifffahrt hinsichtlich der Integration ins Verkehrssystem

Kraftstoffpfad		C3Mobility_#1.1	E2Fuels_#1.1	E2Fuels_#2.1	ISystem4EFuel_#1.1	ISystem4EFuel_#2.1	MethQuest_#5	PlasmaFuel_#1	SynLink_#2.1
Kraftstoff		Methanol	LNG	Methanol	30 % <sub>Vol</sub> OME + 70 % <sub>Vol</sub> fossiler Diesel	30 % <sub>Vol</sub> HVO + 70 % <sub>Vol</sub> fossiler Diesel	LNG	Diesel	Methanol
Kosten für Betreiber (Anschaffung und Kraftstoff)	Anschaffungskosten	+3	-4	+3	+4	+4	-4	+4	+3
	Kraftstoffkosten	-3	-3	-3	+1	+3	-3	-4	-3
	<b>gesamt</b>	<b>-3</b>	<b>-3</b>	<b>-3</b>	<b>+1</b>	<b>+3</b>	<b>-3</b>	<b>-4</b>	<b>-3</b>
Tankvorgang	Betankungsdauer	+4	+4	+4	+4	+4	+4	+4	+4
	Reichweite	-1	+1	-1	+1	+3	+1	+3	-1
	<b>gesamt</b>	<b>+2</b>	<b>+3</b>	<b>+2</b>	<b>+3</b>	<b>+4</b>	<b>+3</b>	<b>+4</b>	<b>+2</b>
Verfügbarkeit Tankstellen	Verfügbarkeit Tankstellen / Tankmöglichkeiten	-1	+4	-1	-2	+3	+4	+4	-1
	Aufwand für ausreichende Tankstellenabdeckung	0	+4	0	-2	+3	+4	+4	0
	<b>gesamt</b>	<b>-1</b>	<b>+4</b>	<b>-1</b>	<b>-2</b>	<b>+3</b>	<b>+4</b>	<b>+4</b>	<b>-1</b>

**Bereich Luftfahrt**

Da es sich bei den Verbundpfaden um Mischungen aus 50 %<sub>Vol</sub> synthetischem Kerosin mit fossilem Jet A-1 handelt, entspricht die Bewertung der Kraftstoffkosten der generischen 50 %-Mischung. Ähnliches gilt für die Anschaffungskosten. Hier wurde bei den Pfaden KERO-SyN100\_#1 und PowerFuel\_#2.1 berücksichtigt, dass es sich um noch nicht zertifizierte Treibstoffe handelt, die aber jeweils große Ähnlichkeit zu bereits zertifizierten Treibstoffen aufweisen. Da zum jetzigen Zeitpunkt (Juli 2023) noch keine Zulassung erfolgt ist, können Mehrkosten in der Anschaffung, z.B. aufgrund von Einzelzulassungen oder einzelnen Flugzeugfreigaben, nicht ausgeschlossen werden.

Hinsichtlich der Kriterien des Tankvorgangs und der Tankstellenverfügbarkeit erfolgte die Bewertung ebenfalls analog der generischen 50 %-Mischung.

**Tabelle 5-15:** Bewertung der Referenzpfade für die Luftfahrt hinsichtlich der Integration ins Verkehrssystem

Kraftstoffpfad		KEROSYN100_#1	PowerFuel_#1.1	PowerFuel_#2.1
Kraftstoff		Kerosin	Kerosin	Kerosin
<b>Kosten für Betreiber (Anschaffung und Kraftstoff)</b>	Anschaffungskosten	+3	+4	+3
	Kraftstoffkosten	0	0	0
	<b>gesamt</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>
<b>Tankvorgang</b>	Betankungsdauer	+4	+4	+4
	Reichweite	+4	+4	+4
	<b>gesamt</b>	<b>+4</b>	<b>+4</b>	<b>+4</b>
<b>Verfügbarkeit Tankstellen</b>	Verfügbarkeit Tankstellen / Tankmöglichkeiten	+3	+3	+3
	Aufwand für ausreichende Tankstellenabdeckung	+3	+3	+3
	<b>gesamt</b>	<b>+3</b>	<b>+3</b>	<b>+3</b>

**Bereich Rückverstromung**

Die Bewertung des Pfades MethQuest\_#4 erfolgt analog dem generischen Methan. Für die anderen Pfade muss ein Anteil von 67 %<sub>Vol</sub> (LeanStoichH2) bzw. 25 %<sub>Vol</sub> (E2Fuels) Wasserstoff berücksichtigt werden. Die Anschaffungskosten wurden mit +3 bewertet, da höhere Kosten aufgrund des hohen Wasserstoffanteils nicht ausgeschlossen werden können. Es sind zwar bekannte Kraftwerkskonzepte und Verbrennungsmaschinen nutzbar, evtl. müssen aber wegen der Gefahr der Wasserstoffversprödung andere Materialien verbaut werden oder es sind gesonderte Nachweise für den sicheren Betrieb und das Einhalten von Emissionsrichtlinien erforderlich. Die Kosten für den Brennstoff werden analog zu den verschiedenen Verkehrsbereichen auf die gravimetrische Brennstoffmenge bezogen. Wird der generische Fall (min. Gestehungskosten großskalig für 2018) zugrunde gelegt, betragen diese 4,74 €/kg für Wasserstoff und 2,68 €/kg für Methan. Dadurch ergeben sich für die Hythan-Mischungen deutlich höhere Kosten als für reines, synthetisches Methan, weswegen auch hier die Bewertung mit -4 erfolgt. Auf den unteren Heizwert bezogen, wären die Kosten für den Brennstoff hingegen ähnlich dem Methan (vgl. dazu die Bewertung der generischen Pfade der Kraftstoffherstellung im Kapitel 4.2).

Im Bereich der übrigen Infrastrukturkriterien lässt sich für die Nutzung von Methan-Wasserstoff-Mischungen noch nicht abschätzen, inwieweit die bestehende Versorgungsinfrastruktur

genutzt werden kann oder wie hoch der Aufwand für eine flächendeckende Abdeckung wäre. Diese Bereiche wurden daher jeweils mit 0 bewertet.

**Tabelle 5-16:** Bewertung der Referenzpfade für die Rückverstromung hinsichtlich der Integration ins Verkehrssystem

Kraftstoffpfad		E2Fuels_#4	LeanStoichH2_#1	MethQuest_#4
Kraftstoff		25 % <sub>vol</sub> H <sub>2</sub> + 75 % <sub>vol</sub> CH <sub>4</sub>	67 % <sub>vol</sub> H <sub>2</sub> + 33 % <sub>vol</sub> CH <sub>4</sub>	CNG
<b>Kosten für Betreiber (Anschaffung und Kraftstoff)</b>	Anschaffungskosten	+3	+3	+4
	Kraftstoffkosten	-4	-4	-4
	<b>gesamt</b>	<b>-4</b>	<b>-4</b>	<b>-4</b>
<b>Tankvorgang</b>	Betankungsdauer	+4	+4	+4
	Reichweite	+4	+4	+4
	<b>gesamt</b>	<b>+4</b>	<b>+4</b>	<b>+4</b>
<b>Verfügbarkeit Tankstellen</b>	Verfügbarkeit Tankstellen / Tankmöglichkeiten	0	0	+4
	Aufwand für ausreichende Tankstellenabdeckung	0	0	+4
	<b>gesamt</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>+4</b>

## 5.5 Ökologische Bewertung

Die Bewertung der Verbundpfade erfolgt aus unterschiedlichen Datenquellen. In einigen Verbänden wurden im Laufe der Projekte Ökobilanzen durchgeführt. Diese Verbände stellten BEniVer teilweise die Ergebnisse zur Verfügung. Um eine Vergleichbarkeit der Ergebnisse zu gewährleisten, wurde ein Methodikleitfaden veröffentlicht. Außerdem wurden innerhalb einer Arbeitsgemeinschaft (AG LCA) im Projektverlauf Zwischenergebnisse diskutiert und grundlegende Annahmen ausgetauscht. Bei Verbänden, die keine Ökobilanz im Projekt durchgeführt haben, wurden basierend auf abgefragten Energie- und Stoffströmen und den generellen Rahmenannahmen Ökobilanzen im Rahmen von BEniVer durchgeführt. Die folgende Tabelle gibt einen Überblick über die Verbände und die jeweilige Datengrundlage für die Bewertung der Pfade.

**Tabelle 5-17:** Datengrundlage für die ökologische Bewertung der Verbundpfade

<b>Verbund</b>	<b>Datengrundlage der ökologischen Bewertung</b>
<b>C3Mobility</b>	Basierend auf Daten der TÖA sowie ergänzenden Informationen in der Prozessdokumentation
<b>CombiFuel</b>	Basierend auf Daten der TÖA
<b>E2Fuels</b>	Basierend auf Daten der TÖA
<b>FlexDME</b>	Basierend auf Daten der TÖA sowie ergänzenden Informationen in der Prozessdokumentation
<b>ISystem4EFuel</b>	Keine ökologische Bewertung, da im Verbund keine Betrachtung der Herstellung des Kraftstoffes durchgeführt wurde
<b>KEROSyN100</b>	LCA-Ergebnisse des Verbundes übernommen
<b>LeanStoichH2</b>	Keine ökologische Bewertung, da im Verbund keine Betrachtung der Herstellung des Kraftstoffes durchgeführt wurde
<b>MEEMO</b>	Basierend auf Daten aus dem internen Abschlussbericht
<b>MethQuest</b>	LCA-Ergebnisse des Verbundes übernommen
<b>NAMOSYN</b>	LCA-Ergebnisse des Verbundes übernommen
<b>PlasmaFuel</b>	Basierend auf Daten der TÖA
<b>PowerFuel</b>	Zum Zeitpunkt der Bewertung noch keine finalen Ergebnisse der LCA vorhanden
<b>SolareKraftstoffe</b>	Keine Bewertung in der Bewertungsmatrix, da ein anderer geographischer Rahmen als bei den restlichen Pfaden verwendet wurde
<b>SynLink</b>	LCA-Ergebnisse des Verbundes übernommen

**Bereich Pkw**

Im Bereich Pkw werden insgesamt neun Pfade bewertet. Die beiden Pfade aus dem Verbund SolareKraftstoffe werden innerhalb der Bewertungsmatrix nicht bewertet. Ihre Ergebnisse beruhen auf anderen geographischen Annahmen. Der Pfad NAMOSYN\_#2 wurde im Rahmen des NAMOSYN-Projektes nicht ökobilanziell bewertet.

**Tabelle 5-18:** Ökologische Bewertung der Verbundpfade im Bereich Pkw

Kraftstoffpfad		C3Mobility_#3.1	MEEMO_#1	MethQuest_#1	NAMOSYN_#1.1	NAMOSYN_#2.1	NAMOSYN_#2.2	SolareKraftstoffe_#1	SolareKraftstoffe_#2	SynLink_#2.2
Kraftstoff		MtG Benzin	Methanol	Methan	OME	65 Vol-% DMC + 35 Vol-% MeFo	15 Vol-% MeFo + 85 Vol-% Methanol	Benzin	Benzin	30 Vol % Methanol 70 Vol % fossiler Diesel
THG-Emissionen	2018	-2	-1	-2	-4	-4	k. A.	n.a.	n.a.	+2
	2030	+3	+3	+3	+3	+2	k. A.	n.a.	n.a.	+3
	2045	+4	+4	+4	+4	+4	k. A.	n.a.	n.a.	+3
Kumulierter Energieaufwand	2018	-3	-2	-3	-4	-4	k. A.	n.a.	n.a.	+2
	2030	+2	+2	+2	+2	+2	k. A.	n.a.	n.a.	+2
	2045	+3	+3	+3	+4	+4	k. A.	n.a.	n.a.	+3
Ursprung des verwendeten CO <sub>2</sub>		0	+2	+2	0	0	0	0	0	+4

Für die bewerteten Pfade ergibt sich für den Großteil ein ähnliches Bild: 2018 schneiden alle Pfade hinsichtlich der THG-Emissionen und des KEAs relativ schlecht ab. Im Jahr 2045 verbessern sich alle Pfade auf eine Bewertung von +3 bzw. +4. Auffällig ist hier der Pfad SynLink\_#2.2, der mit einer für das Jahr 2018 vergleichsweise guten Bewertung startet (+2), sich allerdings bis 2045 nicht so stark verbessert (auf +3) wie die anderen Pfade. Grund dafür ist der hohe Anteil an fossilem Diesel. Er bewirkt, dass die Verbesserungspotenziale durch Effizienzsteigerungen im Herstellungsprozess und der grüne Strommix sich nicht so stark auf das Gesamtergebnis auswirken.



**Bereich leichte Nutzfahrzeuge**

Im Bereich leichte Nutzfahrzeuge werden zwei Pfade bewertet. Ihre Bewertung ist in Tabelle 5-19 dargestellt.

**Tabelle 5-19:** Ökologische Bewertung der Verbundpfade im Bereich leichte Nutzfahrzeuge

Kraftstoffpfad		C3Mobility_#2	CombiFuel_#1.1
Kraftstoff		DME	Hythan
Treibhausgasemissionen	2018	-1	+2
	2030	+3	+3
	2045	+4	+3
Kumulierter Energieaufwand	2018	-1	+1
	2030	+3	+3
	2045	+4	+3
Ursprung des verwendeten CO <sub>2</sub>		0	+2

Der DME-Pfad des Projekts C3Mobility schneidet etwas besser ab als der vergleichbare generische Pfad (vgl. Tabelle 4-20). Der CombiFuel-Pfad erhält die bessere Bewertung der THG-Emissionen und des KEAs in diesem Bereich für das Jahr 2018 und die schlechtere für das Jahr 2045. Dies liegt an dem dort betrachteten Prozess und den verwendeten Rohstoffen: Für die Herstellung des Hythans wird Biogas und Zentratwasser aus Abwasser verwendet. Zentratwasser geht als Abfallprodukt eines anderen Prozesses ohne Emissionen in den Herstellungsprozess. Die Emissionen des Biogases werden maßgeblich durch dessen Herstellung beeinflusst. Diese Biogasherstellung wird als fixer Wert über alle Jahre angenommen. Das führt dazu, dass das Hythan sich über die Jahre nicht so stark verbessert, wie die anderen Kraftstoffe.

**Bereich schwere Nutzfahrzeuge**

Im Bereich schwere Nutzfahrzeuge werden fünf Pfade aus drei Verbänden bewertet. Die Bewertung ist in Tabelle 5-20 dargestellt.

**Tabelle 5-20:** Ökologische Bewertung der Verbundpfade im Bereich schwere Nutzfahrzeuge

Kraftstoffpfad		C3Mobility_#1.2	E2Fuels_#3.1	FlexDME_#1	SynLink_#1.1	SynLink_#1.2	SynLink_#1.3
Kraftstoff		Methanol	OME	DME	20% NT-FT-Diesel + 80% fossiler Diesel	Diesel	Diesel
Treibhausgasemissionen	2018	-2	k.A.	-1	0	-3	-4
	2030	+3	k.A.	+1	+3	+3	+3
	2045	+4	k.A.	0	+3	+4	+4
Kumulierter Energieaufwand	2018	-2	k.A.	0	0	-3	-4
	2030	+2	k.A.	+2	+2	+2	+2
	2045	+3	k.A.	+1	+3	+4	+4
Ursprung des verwendeten CO <sub>2</sub>		0	0	+2	+4	+4	+4

Die Bewertung zeigt eine etwas schlechtere Bewertung der beiden Dieselmotorkraftstoffe im Vergleich zu Methanol und DME auf. Der SynLink\_#1.1-Pfad zeigt eine gute Bewertung in 2018 und ein geringes Verbesserungspotenzial bis 2045, was am hohen fossilen Anteil im Kraftstoff liegt. Ähnlich fällt auch die Bewertung des FlexDME-Pfades auf. Hierfür sind die Vorkettenemissionen des Biogases, welches als C-Quelle verwendet wird, verantwortlich. Diese verbessern sich über die Jahre nicht wie bei den anderen C-Quellen (z. B. DAC oder Rauchgasabscheidung), da sie nicht im Vordergrund-System modelliert wurden. Durch die Dekarbonisierung der gesamten Lieferkette von Biogas, ist hier also auch im Jahr 2045 noch ein hohes Reduktionspotenzial vorhanden.

**Bereich Schifffahrt**

Im Bereich Schifffahrt werden sechs Pfade aus fünf Verbänden bewertet.

**Tabelle 5-21:** Ökologische Bewertung der Verbundpfade für die Schifffahrt

Kraftstoffpfad		C3Mobility_#1.1	E2Fuels_#1.1	E2Fuels_#2.1	ISystem4EFuel_#1.1	ISystem4EFuel_#2.1	MethQuest_#5	PlasmaFuel_#1	SynLink_#2.1
Kraftstoff		Methanol	LNG	Methanol	30 % <sub>vol</sub> OME + 70 % <sub>vol</sub> fossiler Diesel	30 % <sub>vol</sub> HVO + 70 % <sub>vol</sub> fossiler Diesel	LNG	Diesel	Methanol
Treibhausgasemissionen	2018	-1	0	-1	n.a.	n.a.	-2	-4	-2
	2030	+3	+3	+3	n.a.	n.a.	+3	+1	+3
	2045	+4	+4	+4	n.a.	n.a.	+4	+2	+4
Kumulierter Energieaufwand	2018	+2	+2	+1	n.a.	n.a.	+1	-4	0
	2030	+3	+3	+3	n.a.	n.a.	+3	+3	+3
	2045	+4	+4	+4	n.a.	n.a.	+4	+4	+4
Ursprung des verwendeten CO <sub>2</sub>		0	0	0	0	0	+4	0	+4

Der PlasmaFuel-Pfad erhält für alle drei Jahre die schlechteste Bewertung. Dies ist auf die niedrige Effizienz in der Herstellung des Dieselmotorkraftstoffes zurückzuführen. Bei dem E2Fuels\_#1.1-Pfad und dem MethQuest\_#5-Pfad handelt es sich jeweils um LNG. Trotzdem schneidet der E2Fuels-Pfad im Jahr 2018 besser ab als der MethQuest\_#5 und der generische Pfad. Dies liegt am geringeren Wasserstoffbedarf in der Synthese.

**Bereich Luftfahrt**

Im Bereich Luftfahrt wird ökobilanziell nur die Pfade von KEROSyn100 und PowerFuel bewertet. Dies ist in Tabelle 5-22 dargestellt.

**Tabelle 5-22:** Ökologische Bewertung der Verbundpfade für die Luftfahrt

Kraftstoffpfad		KEROSyn100_#1	PowerFuel_#1.1	PowerFuel_#2.1
Kraftstoff		Kerosin	Kerosin	Kerosin
Treibhausgasemissionen	2018	-3	k.A.	k.A.
	2030	+3	k.A.	k.A.
	2045	+4	k.A.	k.A.
Kumulierter Energieaufwand	2018	-3	k.A.	k.A.
	2030	+2	k.A.	k.A.
	2045	+4	k.A.	k.A.
Ursprung des verwendeten CO <sub>2</sub>		-2	+4	+4

Der KEROSyn100-Pfad schneidet durchschnittlich etwas besser als der generische Vergleichspfad ab (vgl. Bereich Luftfahrt in Kapitel 4.5).

**Bereich Rückverstromung**

Im Bereich Rückverstromung werden drei Pfade aus drei Verbänden in Tabelle 5-23 bewertet. Für LeanStoichH2 und MethQuest liegen allerdings keine Ökobilanzergebnisse vor.

**Tabelle 5-23:** Ökologische Bewertung der Verbundpfade für die Rückverstromung

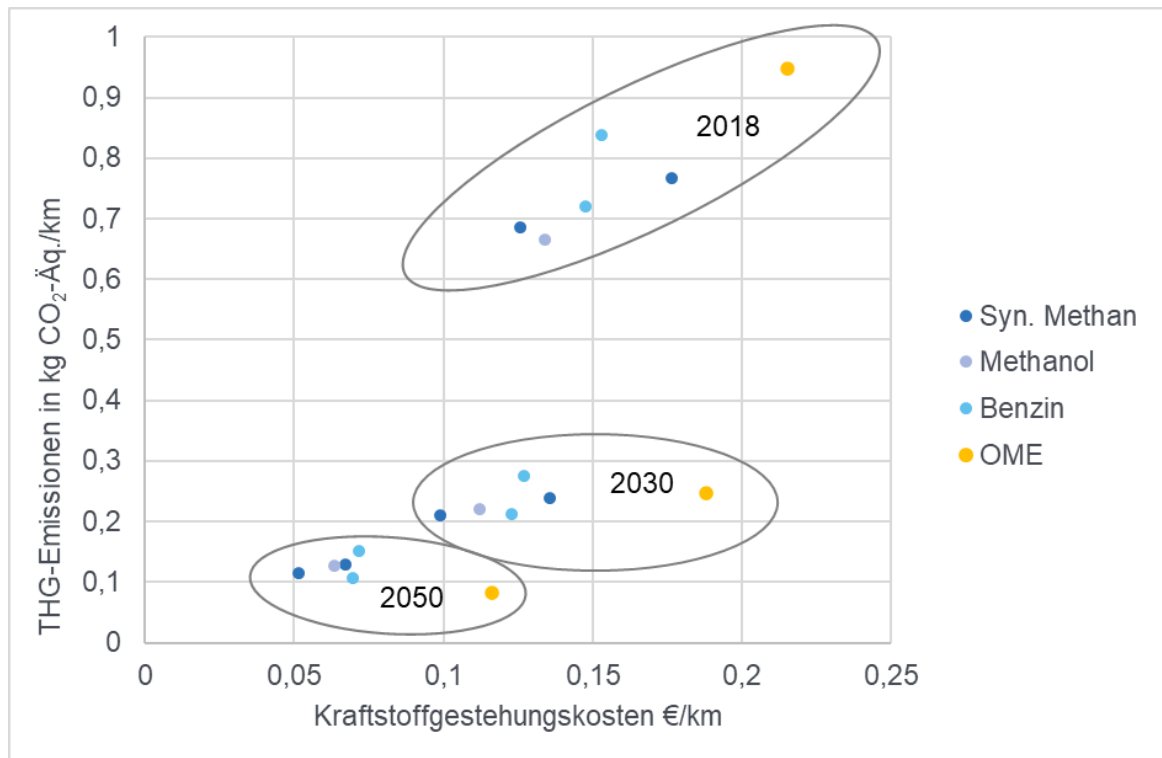
Kraftstoffpfad		E2Fuels_#4	LeanStoichH2_#1	MethQuest_#4
Kraftstoff		25 % <sub>vol</sub> H <sub>2</sub> + 75 % <sub>vol</sub> CH <sub>4</sub>	67 % <sub>vol</sub> H <sub>2</sub> + 33 % <sub>vol</sub> CH <sub>4</sub>	CNG
Treibhausgasemissionen	2018	-2	n.a.	k.A.
	2030	+3	n.a.	k.A.
	2045	+4	n.a.	k.A.
Kumulierter Energieaufwand	2018	-2	n.a.	k.A.
	2030	+2	n.a.	k.A.
	2045	+4	n.a.	k.A.
Ursprung des verwendeten CO <sub>2</sub>		0	-2	-2

Ökobilanziell schneidet der E2Fuels-Pfad besser ab, als der vergleichbare generische Methan-Pfad (vgl. Tabelle 4-24). Dies ist auf die geringeren Emissionen von Hythan zurückzuführen. Hythan verursacht durch den zusätzlichen Wasserstoff im Kraftstoff geringere Emissionen in der Verbrennung und weniger Umwandlungsverluste bei der Herstellung des Kraftstoffes.

**Kosten vs. Klimabilanz**

Im Nachfolgenden wird, basierend auf den Ergebnissen der Ökobilanzierung und den Nutzerkosten, ein Vergleich der Kraftstoffe durchgeführt. Diese Auswertung ist angelehnt an die Ökoeffizienzanalyse, definiert in der DIN 14045, und hilft dabei, Umweltwirkungen über den Verlauf des Lebenswegs in Bezug zu den verursachten Kosten zu stellen.

Für die Umweltwirkungen werden die Treibhausgase, die bei der Fahrt von einem km über den gesamten Lebenszyklus entstehen, herangezogen. Verglichen werden dabei die verschiedenen Kraftstoffe. Als Kosten werden die Kosten für die Herstellung der Kraftstoffe und der jeweilige Kraftstoffverbrauch im Fahrzeug verwendet. Diese beinhalten also nicht die Kosten für die Anschaffung bzw. Umrüstung des Fahrzeugs. Um die Ökoeffizienz der einzelnen Pfade zu vergleichen, werden die THG-Emissionen über den Kosten aufgetragen. Die Ergebnisse für die verschiedenen Bereiche sind in den folgenden Abbildungen dargestellt.

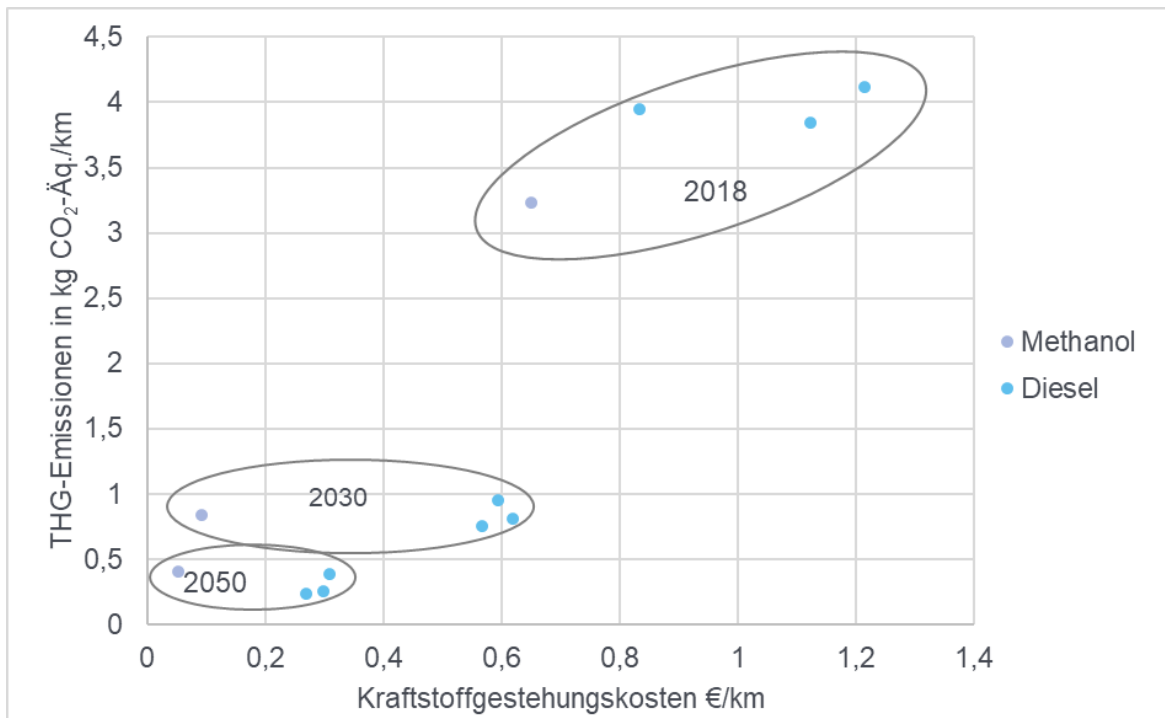


**Abbildung 5-6:** Kosten und Klimawirkung verschiedener Kraftstoffe bei der Nutzung im Pkw

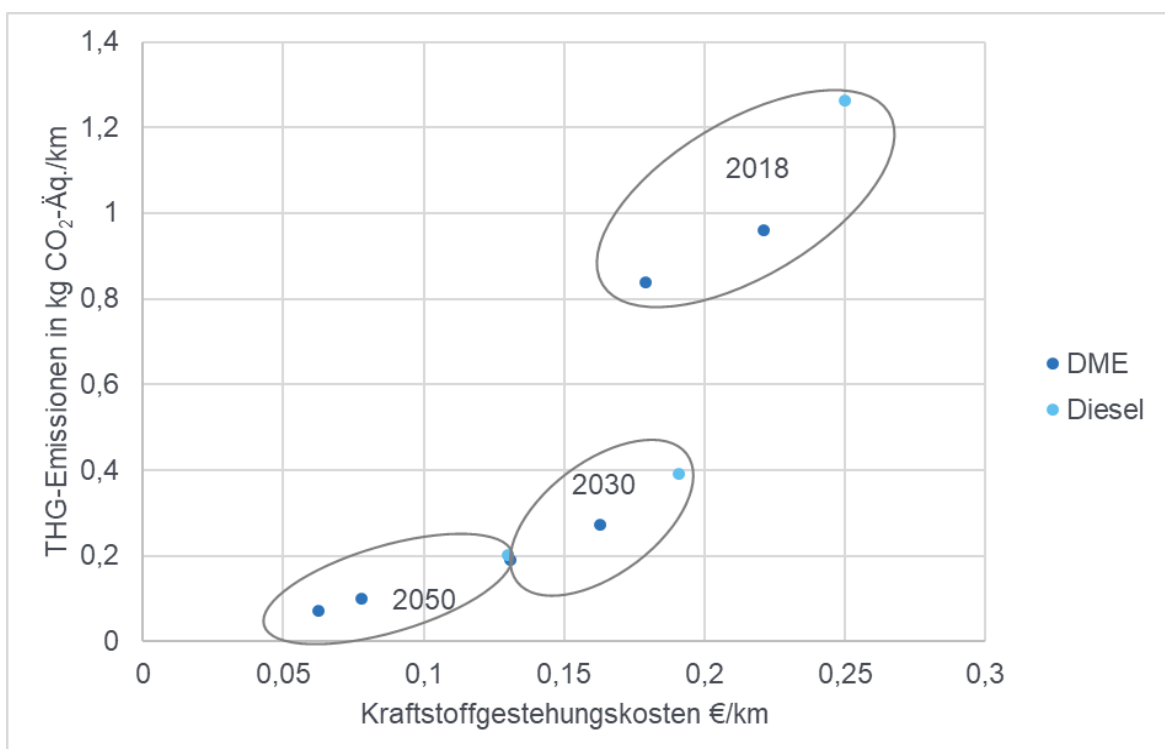
Sowohl die Kosten als auch die Klimawirkung sinken über die Jahre, was insbesondere auf den zugrundeliegenden Strommix zurückzuführen ist. Der Anteil an erneuerbaren Energien im Strommix nimmt über die Zeit zu. Dadurch sinken dessen THG-Emissionen und er wird günstiger. Außerdem verbessert sich die Effizienz der Prozesse und des Kraftstoffverbrauchs im Fahrzeug, was ebenfalls zu einer Kostenreduktion und zur Verringerung der Klimawirkung beiträgt.

Im Allgemeinen lässt sich aus allen Abbildungen ableiten, dass die Streuung der Punkte über die Jahre abnimmt. Das heißt, dass sich die Kraftstoffe und Herstellungspfade hinsichtlich der Kosten und Klimawirkung im Jahr 2045 weniger unterscheiden. Beim Vergleich der Kraftstoffe innerhalb eines Jahres gilt generell die Tendenz, dass je teurer der Kraftstoff ist, desto höher auch dessen Emissionen sind. Grund dafür ist, dass sowohl die Kosten, als auch die Emissionen abhängig von der Effizienz der Herstellung und dem Kraftstoffverbrauch im Fahrzeug sind.

Bei den schweren und leichten Nutzfahrzeugen zeichnen sich ähnliche Ergebnisse ab, wie in Abbildung 5-7 und Abbildung 5-8 dargestellt ist. Außerdem wird deutlich, dass Diesel sowohl hinsichtlich der Kosten als auch der Klimawirkung etwas schlechter abschneidet. Dies liegt an der geringeren Effizienz der Herstellung.

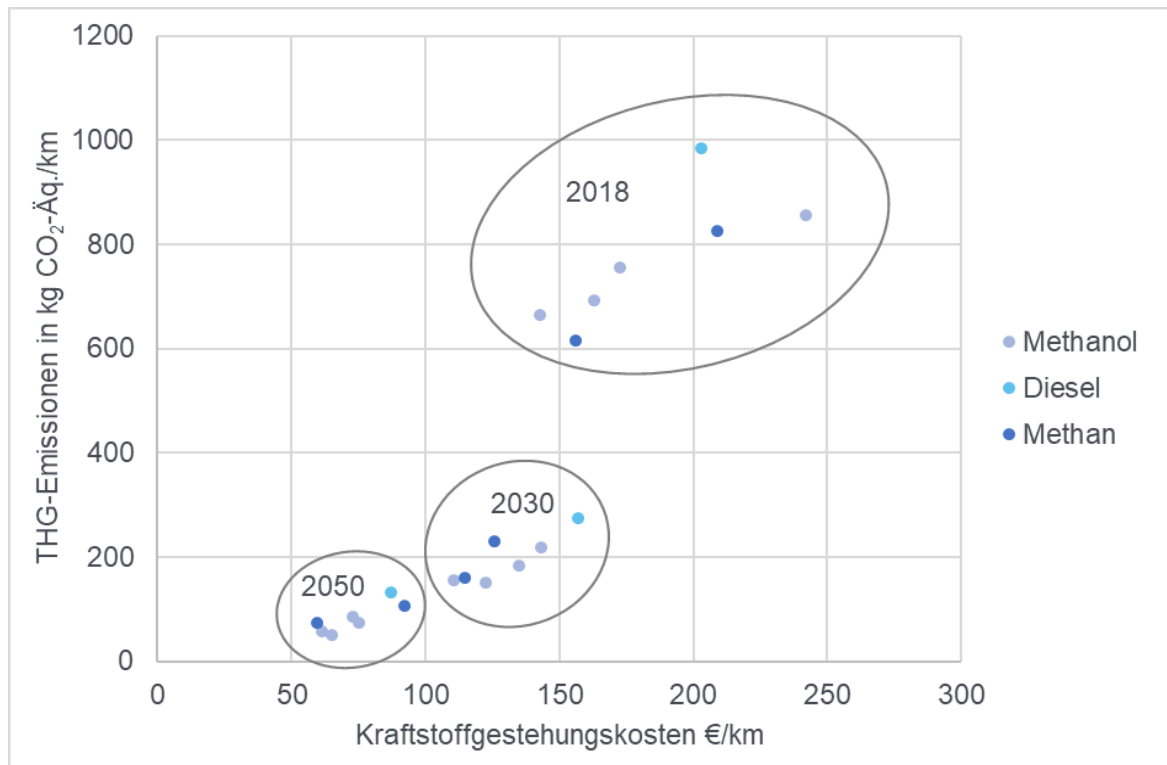


**Abbildung 5-7:** Kosten und Klimawirkung von Kraftstoffen bei der Nutzung in schweren Nutzfahrzeugen



**Abbildung 5-8:** Kosten und Klimawirkung von Kraftstoffen bei der Nutzung in leichten Nutzfahrzeugen

In Abbildung 5-9 sind die Pfade aus dem Bereich Schifffahrt aufgetragen. Der Pfad von Plasmafuel hat sowohl bei den Kosten, als auch der Klimawirkung die deutlich schlechteste Bewertung. Um die Abbildung übersichtlicher zu halten, wurde er im Bereich Schifffahrt deshalb nicht dargestellt. Im Bereich Luftfahrt wurden nur die beiden Pfade mit reinem synthetischen Kerosin in Abbildung 5-10 aufgetragen. Hier zeigt sich, dass die relative Differenz der Kosten im Jahr 2018 und 2030 deutlich höher ist, als die Differenz der Klimawirkung.



**Abbildung 5-9:** Kosten und Klimawirkung von Kraftstoffen bei der Nutzung in der Schifffahrt



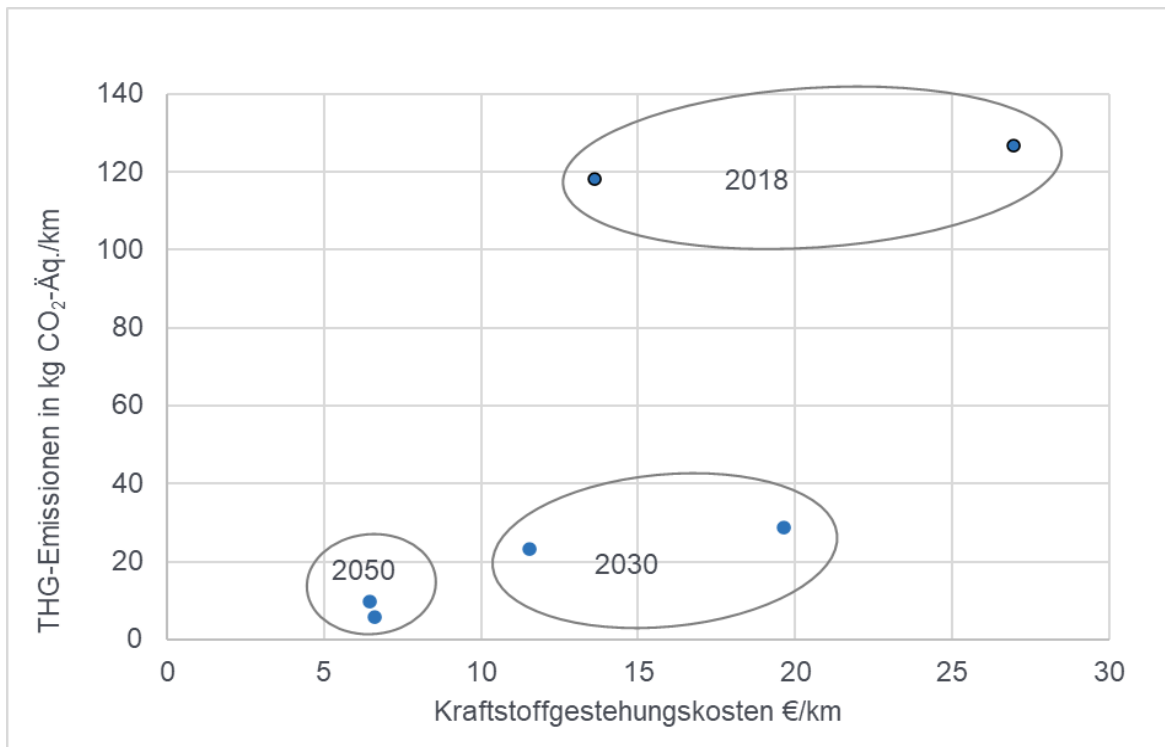


Abbildung 5-10: Kosten und Klimawirkung von Kerosin im Bereich Luftfahrt

## 5.6 Akzeptanz

### Bereich Pkw

Tabelle 5-24: Bewertungsübersicht Akzeptanz: Bereich Pkw

Kraftstoffpfad	C3Mobility_#3.1	C3Mobility_#5	MEEMO_#1	MethQuest_#1	NAMOSYN_#1.1	NAMOSYN_#2.1	NAMOSYN_#2.2	SolareKraftstoffe_#1	SolareKraftstoffe_#2	SynLink_#2.2
Kraftstoff	MtG Benzin	Oktanol	Methanol	Methan	OME	65 % <sub>vol</sub> DMC + 35 % <sub>vol</sub> MeFo	MeFo	Benzin	Benzin	15 % <sub>vol</sub> Methanol + 85 % <sub>vol</sub> Benzin
Kosten / Nutzen	+1	0	k.A.	+1	0	+1	+1	k.A.	k.A.	+3
Umweltwirkungen	+1	0	+2	+1	+1	+1	+1	-1	-1	+2
Anwendungstauglichkeit	+2	k.A.	-1	0	-1	-1	-2	+3	+3	0

Für den Anwendungsbereich Pkw weist die Bewertungstabelle den Kraftstoff MtG Benzin (C3Mobility\_#3.1) als einzige Option mit positiver Bewertung in allen drei Kriterien, und somit ohne größere Schwachpunkte, aus. Vor allem bei der Anwendungstauglichkeit kann dieser Pfad überzeugen, wie auch die anderen Benzin-Pfade (SolareKraftstoffe\_#1 und #2). Der Methanol-Blend (SynLink\_#2.2) hingegen kann zwar mit deutlichen Vorteilen bei Kosten / Nutzen und Umweltwirkungen aufwarten, hat aber Nachteile im Kriterium Anwendungstauglichkeit.

### **Bereiche leichte und schwere Nutzfahrzeuge (LNF, SNF)**

**Tabelle 5-25** Bewertungsübersicht Akzeptanz: Bereiche LNF und SNF

Kraftstoffpfad	C3Mobility_#1.2	E2Fuels_#3.1	FlexDME_#1	SynLink_#1.1	SynLink_#1.2	SynLink_#1.3	C3Mobility_#2 (Lnf)	C3Mobility_#4.1 (Lnf)	CombiFuel_#1.1 (Lnf)
Kraftstoff	Methanol	30 % <sub>vol</sub> OME + 70 % <sub>vol</sub> fossiler Diesel	DME	20 % <sub>vol</sub> NT-FT-Diesel + 80 % <sub>vol</sub> fossiler Diesel	Diesel	Diesel	DME	Butanol	30 % <sub>vol</sub> H <sub>2</sub> + 70 % <sub>vol</sub> CH <sub>4</sub>
<b>Kosten / Nutzen</b>	+2	-1	+2	+1	-1	-1	+2	0	+4
<b>Umweltwirkungen</b>	+1	0	+1	+2	+1	+1	+2	0	+2
<b>Anwendungstauglichkeit</b>	-1	0	-1	+2	+2	+2	-1	k.A.	-1

Bei den leichten Nutzfahrzeugen weist Hythan (CombiFuel\_#1.1) insgesamt die besten Werte auf, wobei jedoch im Anwendungs-Kriterium nur ein leicht negativer Wert erreicht wird. Bei den schweren Nutzfahrzeugen bieten die beste Anwendungstauglichkeit die Dieselmotoren (SynLink-Pfade), welche auch gute Umwelt-Werte aufweisen. Mit Kosten / Nutzen-Vorteilen kann Methanol aufwarten (C3Mobility\_#1.2).

**Bereich Schifffahrt****Tabelle 5-26** Bewertungsübersicht Akzeptanz: Bereich Schifffahrt

Kraftstoffpfad	C3Mobility_#1.1	E2Fuels_#1.1	E2Fuels_#2.1	ISystem4EFuel_#1.1	ISystem4EFuel_#2.1	MethQuest_#5	PlasmaFuel_#1	SynLink_#2.1
Kraftstoff	Methanol	Methan	Methanol	30% <sub>vol</sub> OME + 70% <sub>vol</sub> fossiler Diesel	30% <sub>vol</sub> HVO + 70% <sub>vol</sub> fossiler Diesel	Methan	Diesel	Methanol
<b>Kosten / Nutzen</b>	+2	+1	+1	k.A.	k.A.	+2	-3	+1
<b>Umweltwirkungen</b>	+2	+2	+2	0	-1	+2	0	+2
<b>Anwendungstauglichkeit</b>	0	+1	0	0	+3	+1	+2	0

Im Anwendungsbereich Schifffahrt zeigt sich bei vielen Kraftstoffen das Erfordernis eines Trade-off zwischen Kosten / Nutzen und Umweltwirkungen auf der einen Seite und Anwendungstauglichkeit auf der anderen Seite. Der beste Kompromiss stellt LNG dar (MethQuest\_#5 und E2Fuels\_#1.1), das in allen drei Kriterien positive Werte aufweist, dabei aber in der Anwendungstauglichkeit nicht ganz so gute Werte wie die Diesel-Pfade erreicht (ISystem4EFuel\_#2.1 und PlasmaFuel\_#1).

**Bereich Luftfahrt****Tabelle 5-27** Bewertungsübersicht Akzeptanz: Bereich Luftfahrt

Kraftstoffpfad	KEROSyN100_#1	PowerFuel_#1.1	PowerFuel_#2.1
Kraftstoff	Kerosin	Kerosin	Kerosin
<b>Kosten / Nutzen</b>	+2	k.A.	k.A.
<b>Umweltwirkungen</b>	0	+1	+1
<b>Anwendungstauglichkeit</b>	+2	+3	+3

Unter dem Vorbehalt, dass für die PowerFuel-Pfade keine Kosten / Nutzen-Werte berechnet werden konnten, lässt sich sagen, dass keiner der drei Luftfahrt-Pfade auffällige Schwachpunkte (in Form negativer Bewertungen) aufweist.

### **Bereich Rückverstromung**

**Tabelle 5-28** Bewertungsübersicht Akzeptanz: Bereich Rückverstromung

Kraftstoffpfad	E2Fuels_#4	LeanStoichH2_#1	MethQuest_#4
Kraftstoff	25 % <sub>v/v</sub> H <sub>2</sub> + 75 % <sub>v/v</sub> CH <sub>4</sub>	67 % <sub>v/v</sub> H <sub>2</sub> + 33 % <sub>v/v</sub> CH <sub>4</sub>	Methan
Kosten / Nutzen	+1	k.A.	+2
Umweltwirkungen	+1	0	-1
Anwendungstauglichkeit	0	0	+1

Bei den drei Pfaden zur Rückverstromung zeigt sich ein recht ausgeglichenes Bewertungsbild, wobei zum Kriterium Kosten/Nutzen keine Angaben von LeanStoichH2 vorliegen. Bzgl. der Anwendungstauglichkeit gibt es leichte Vorteile für den CNG-Pfad (MethQuest\_#4) gegenüber den beiden Hythan-Pfaden.

## 5.7 Markteinführung

### Bereich Pkw

**Tabelle 5-29** Bewertungsübersicht Markteinführung: Bereich Pkw

Kraftstoffpfad			C3Mobility_#3.1	C3Mobility_#5	MEMO_#1	MethQuest_#1	NAMOSYN_#1.1	NAMOSYN_#2.1	NAMOSYN_#2.2	SolareKraftstoffe_#1	SolareKraftstoffe_#2	SynLink_#2.2	
Kraftstoff			MtG-Benzin	Oktanol	Methanol	Methan	OME	65 % <sub>Vol</sub> DMC + 35 % <sub>Vol</sub> MeFo	MeFo	Benzin	Benzin	15 % <sub>Vol</sub> Methanol + 85 % <sub>Vol</sub> Benzin	
1) Wie sinnvoll sind MEM aus ökologisch-systemischer Sicht?	1.1) Sinnhaftigkeit von MEM aus systemischer Sicht	Wie weit ist die alternative Technologie in unterschiedlichen Bereichen durchschnittlich entwickelt (gemessen in Technology Readiness Level (TRL))?	-4	-4	-4	-4	-4	-4	-4	-4	-4	-4	
		Wie gut kann die alternative Technologie die Mobilitäts- und Transportbedürfnisse erfüllen?	-4	-4	-4	-4	-4	-4	-4	-4	-4	-4	-4
		Gesamt 1.1	-4	-4	-4	-4	-4	-4	-4	-4	-4	-4	-4
	1.2) Sinnhaftigkeit eines MEM zum Schutz der Ressourcen	Wirkungsgrad der Herstellung	0	0	k.A.	0	-1	0	0	k.A.	k.A.	0	
		C-Ausnutzungsgrad (Zielfuel)	+2	+2	k.A.	+4	+2	+4	+4	k.A.	k.A.	+4	
		C-Ausnutzungsgrad (Summe der Elemente)	+1	-1	k.A.	+4	-1	+2	+3	k.A.	k.A.	+3	
		Flächenverbrauch	-4	-4	k.A.	-4	-4	-4	-4	k.A.	k.A.	-4	
		Gesamt 1.2	0	-1	k.A.	+1	-1	+1	+1	k.A.	k.A.	+1	

Kraftstoffpfad			C3Mobility_#3.1	C3Mobility_#5	MEEMO_#1	MethQuest_#1	NAMOSYN_#1.1	NAMOSYN_#2.1	NAMOSYN_#2.2	SolareKraftstoffe_#1	SolareKraftstoffe_#2	SynLink_#2.2
Kraftstoff			MtG-Benzin	Oktanol	Methanol	Methan	OME	65 %vol DMC + 35 %vol MeFo	MeFo	Benzin	Benzin	15 %Vol Methanol + 85 %Vol Benzin
		<b>Gesamt 1</b>	-2	-3	k.A.	-2	-3	-2	-2	k.A.	k.A.	-2
2) Kann aus nachfrageseitiger Sicht auf MEM verzichtet werden?	2.1) Bezahlbarkeit	Veränderung der Ausgaben der privaten Haushalte gemessen an den Konsumausgaben	-4	-4	k.A.	-4	-4	-4	-4	k.A.	k.A.	-2
		Veränderung der Produktionskosten	-1	-1	k.A.	-1	-1	-1	-1	k.A.	k.A.	-1
		<b>Gesamt 2</b>	-3	-3	k.A.	-3	-3	-3	-3	k.A.	k.A.	-2
1) Kann aus angebotsseitiger Sicht auf MEM verzichtet werden?	3.1) Upstream	Wie kompatibel ist der Kraftstoffpfad mit bestehender Infrastruktur zur Herstellung synthetischer Kraftstoffe?	0	k.A.	+1	0	-1	+1	+1	+1	0	-1
		Wie groß ist der Bedarf an Koppelprodukten der Herstellung?	-4	k.A.	+3	-4	-4	-4	-4	-4	+3	+4

Kraftstoffpfad			C3Mobility_#3.1	C3Mobility_#5	MEEMO_#1	MethQuest_#1	NAMOSYN_#1.1	NAMOSYN_#2.1	NAMOSYN_#2.2	SolareKraftstoffe_#1	SolareKraftstoffe_#2	SynLink_#2.2
Kraftstoff			MtG-Benzin	Oktanol	Methanol	Methan	OME	65 %vol DMC + 35 %vol MeFo	MeFo	Benzin	Benzin	15 %Vol Methanol + 85 %Vol Benzin
		Gesamt 3.1	-1	k.A.	+2	-1	-2	0	0	+2	+1	-2
	3.2) Midstream	Wie kompatibel ist der Kraftstoffpfad mit bestehender Infrastruktur zum Transport und der Betankung?	+4	k.A.	-2	-1	-2	-2	-2	+4	+4	-2
		3.3) Downstream	Wie kompatibel ist der Kraftstoffpfad mit der bestehenden Fahrzeugflotte?	+4	k.A.	0	-2	-4	-4	-4	+4	+4
	Wie kompatibel ist der Kraftstoff mit bestehenden Normen / Regularien?		+2	k.A.	-3	+4	-1	-2	-2	+4	+4	-1
	Gesamt 3.3		+3	k.A.	-2	+1	-3	-3	-3	+4	+4	-1
		<b>Gesamt 3</b>	<b>+2</b>	<b>k.A.</b>	<b>-1</b>	<b>0</b>	<b>-2</b>	<b>-2</b>	<b>-2</b>	<b>+3</b>	<b>+3</b>	<b>-2</b>

### 1) Wie sinnvoll sind MEM aus ökologisch-systemischer Sicht?

Im Bereich Pkw bestehen bereits, wie in Kapitel 3.7 in Tabelle 3-17 beschrieben, voll entwickelte Alternativen mit batterieelektrischen Fahrzeugen. Deshalb besteht in diesem Bereich nicht die Notwendigkeit, alternative Kraftstoffe einzuführen. Bezogen auf die Ressourceneffizienz bei der Herstellung, schneidet der Pfad MethQuest\_#1 mit synthetischem Methan am besten ab und auch verglichen mit dem generischen Pfad von Methan, schneidet MethQuest leicht besser ab.

Besonders die C-Ausbeute, bezogen auf die Summe der Elemente, ist hier sehr hoch. Neben Methan wären auch die Pfade NAMOSYN\_#2.1 mit einem Kraftstoffblend aus DMC und MeFo, NAMOSYN\_#2.2 mit MeFo und SynLink\_#2.2 mit einem Kraftstoffblend aus Methanol und Benzin als Kraftstoffe vorzugswürdig, da auch hier die stoffliche Nutzung im Vergleich vollständiger ist. Für den Pfad NAMOSYN\_#1.1 mit OME und C3Mobility\_#5 mit Oktanol als Kraftstoff wären dagegen keine MEM, bezogen auf die Ressourceneffizienz in der Herstellung, sinnvoll. C3Mobility\_#3.1 schneidet im Gegensatz zum generischen Benzin leicht besser ab, ist aber aus Ressourceneffizienzgesichtspunkten nur bedingt zu empfehlen. Wegen der guten Alternativen im Pkw-Bereich ist aus ökologisch-systemischer Sicht insgesamt für keinen Kraftstoffpfad eine Ausarbeitung von MEM zu empfehlen.

### 2) Kann aus nachfrageseitiger Sicht auf MEM verzichtet werden?

Eine Belastung für die Verbrauchenden und die Produktion ist bei allen Kraftstoffpfaden vorhanden. Es gibt keine Unterschiede zwischen den Kraftstoffpfaden, die Reinstoffe betrachten. Erwartungsgemäß werden die Verbraucher stärker belastet als die Produktion. MEM sollten deshalb für alle Kraftstoffpfade in Betracht gezogen werden. Das Blend von 15 % synthetischem Methanol in fossilem Benzin, welches im Pfad SynLink\_#2.2 betrachtet wird, verursacht deutlich geringere Kosten für die Haushalte. Aber auch hier ergäbe sich die Notwendigkeit eines MEM.

### 3) Kann aus angebotsseitiger Sicht auf MEM verzichtet werden?

Wird der Blickwinkel geändert und die Notwendigkeit für MEM aus angebotsseitiger Sicht betrachtet, schneiden die Pfade von SolareKraftstoffe durch die hohe Kompatibilität gut ab, so dass hier keine MEM notwendig wären. Im Vergleich zum generischen Benzin ist allerdings der Upstreambereich mit mehr Aufwand verbunden. C3Mobility\_#3.1 mit MtG-Benzin schneidet schlechter ab als der generische Pfad, da es mehr Aufwand beim Infrastrukturaufbau im Upstreambereich und auch keine Koppelprodukte mit hohem Wert besitzt. Auch im Downstreambereich sind leichte Anpassungen notwendig. Dennoch wäre für diesen Kraftstoffpfad aus Angebotssicht kein MEM notwendig. Der Pfad MethQuest\_#1 schneidet bei der Kompatibilität leicht besser ab als der generische Pfad. Die Unterschiede ergeben sich im Upstreambereich; hier wären ggf. MEM für diesen Pfad notwendig. Die weiteren Pfade bedürften aus Angebotssichtweise alle diverser MEM, da hier stärkere Infrastrukturimplikationen notwendig sind. Trotz des Einsatzes als Blend schneidet der Pfad SynLink\_#2.2 schlechter ab als der Pfad für generisches Methanol, welches vor allem auf den höheren Aufwand im Upstreambereich zurückzuführen ist.

### Fazit

Der Verbundpfad MethQuest\_#1 schneidet im Vergleich zum generischen Pfad sowohl ökologisch-systemisch als auch bezogen auf die Angebotsseite besser als der generische Pfad ab. Ökologisch-systemisch gehört er insgesamt zu den Besten im Bereich. Dieser Pfad wäre somit für MEM eher zu bevorzugen.



**Bereich leichte Nutzfahrzeuge****Tabelle 5-30** Bewertungsübersicht Markteinführung: Bereich leichte Nutzfahrzeuge

Kraftstoffpfad			C3Mobility_#2	C3Mobility_#4.1	CombiFuel_#1.1	
Kraftstoff			DME	Butanol	30 % <sub>Vol</sub> H <sub>2</sub> + 70 % <sub>Vol</sub> CH <sub>4</sub>	
1) Wie sinnvoll sind MEM aus ökologisch-systemischer Sicht?	1.1) Sinnhaftigkeit von MEM aus systemischer Sicht	Wie weit ist die alternative Technologie in unterschiedlichen Bereichen durchschnittlich entwickelt (gemessen in Technology Readiness Level (TRL))?	-4	-4	-4	
		Wie gut kann die alternative Technologie die Mobilitäts- und Transportbedürfnisse erfüllen?	-4	-4	-4	
		<b>Gesamt 1.1</b>	-4	-4	-4	
	1.2) Sinnhaftigkeit MEM zum Schutz der Ressourcen	Wirkungsgrad der Herstellung	+1	0	+3	
		C-Ausnutzungsgrad (Zielfuel)	+4	+2	+4	
		C-Ausnutzungsgrad (Summe der Elemente)	+3	-1	+4	
		Flächenverbrauch	-3	-4	-1	
		<b>Gesamt 1.2</b>	+1	-1	+3	
	<b>Gesamt 1</b>		<b>-2</b>	<b>-3</b>	<b>-1</b>	
	2) Kann aus nachfrageseitiger Sicht auf MEM verzichtet werden?	2.1) Bezahbarkeit	Veränderung der Ausgaben der privaten Haushalte gemessen an den Konsumausgaben	-1	-1	+1
			Veränderung der Produktionskosten	-1	-1	+1
<b>Gesamt 2</b>			<b>-1</b>	<b>-1</b>	<b>+1</b>	

Kraftstoffpfad			C3Mobility_#2	C3Mobility_#4.1	CombiFuel_#1.1
Kraftstoff			DME	Butanol	30 %vol H <sub>2</sub> + 70 %vol CH <sub>4</sub>
3) Kann aus angebotsseitiger Sicht auf MEM verzichtet werden?	3.1) Upstream	Wie kompatibel ist der Kraftstoffpfad mit bestehender Infrastruktur zur Herstellung synthetischer Kraftstoffe?	0	k.A.	+2
		Wie groß ist der Bedarf an Koppelprodukten der Herstellung?	-4	k.A.	-4
		Gesamt 3.1	-1	k.A.	+1
	3.2) Midstream	Wie kompatibel ist der Kraftstoffpfad mit bestehender Infrastruktur zum Transport und der Betankung?	-2	k.A.	-4
	3.3) Downstream	Wie kompatibel ist der Kraftstoffpfad mit der bestehenden Fahrzeugflotte?	-4	k.A.	-4
		Wie kompatibel ist der Kraftstoff mit bestehenden Normen / Regularien?	+1	k.A.	0
		Gesamt 3.3	-2	k.A.	-2
	<b>Gesamt 3</b>		<b>-2</b>	<b>k.A.</b>	<b>-2</b>

### 1) Wie sinnvoll sind MEM aus ökologisch-systemischer Sicht?

Im Bereich leichte Nutzfahrzeuge bestehen ebenfalls bereits voll entwickelte Alternativen mit batterieelektrischen Fahrzeugen, wie in Kapitel 3.7 in Tabelle 3-17 beschrieben ist. Deshalb besteht in diesem Bereich nicht die Notwendigkeit, alternative Kraftstoffe einzuführen. Bei der Ressourceneffizienz in der Herstellung schneidet der Pfad CombiFuel\_#1.1 mit Hythan am besten ab. Dieser Kraftstoffpfad zeichnet sich durch eine hohe Effizienz und hohe stoffliche Nutzung aus, mit der er sich deutlich von den anderen Pfaden unterscheidet. Damit hat CombiFuel\_#1.1 auch eine höhere Ressourceneffizienz als der generische Pfad von synthetischem DME; MEM wären bezogen auf den Ressourcenverbrauch deshalb sinnvoll. Der Pfad C3Mobility\_#2, mit DME als Kraftstoff, schneidet ähnlich wie der generische Pfad ab, nur bezogen

auf den Wirkungsgrad ergibt sich ein leicht besserer Wert. Aus ökologisch-systemischer Sicht insgesamt wären MEM dennoch für keinen der Pfade sinnvoll.

### 2) Kann aus nachfrageseitiger Sicht auf MEM verzichtet werden?

Die Ergebnisse zu den Belastungen der Verbraucher und der Gesamtwirtschaft schließen an die Ergebnisse aus ökologisch-systemischer Sichtweise an. Auch hier schneidet CombiFuel\_#1.1 mit Hythan gut ab. Die Kosten können mit diesem Pfad reduziert werden und es ist deshalb der einzige Pfad, bei dem durch die Kostensenkungen kein Markteinführungsmechanismus aus Nachfragesichtweise notwendig wäre. Für die weiteren Pfade ergibt sich eine leichte Belastung der Verbrauchenden und eine etwas größere Belastung der Gesamtwirtschaft, da hier der größte Einsatz dieser Fahrzeuge liegt.

### 3) Kann aus angebotsseitiger Sicht auf MEM verzichtet werden?

Aus Angebotssichtweise ist CombiFuel\_#1.1 mit Hythan nicht zu empfehlen, da keine Infrastruktur im Midstream- und Downstreambereich besteht. Der Aufbau einer solchen Infrastruktur ist, ähnlich wie bei Wasserstoff, sehr aufwändig. Es wären deshalb für diesen Pfad MEM notwendig, was für den generischen Pfad von Dieselkraftstoff nicht der Fall ist. Auch für C3Mobility\_#2 mit DME als Kraftstoff wären MEM notwendig, da die Umrüstung der Mid- und Downstreaminfrastruktur ebenfalls aufwendig ist, wenn auch mit leicht geringerem Aufwand wie Hythan. Im Upstreambereich ergibt sich ebenfalls ein größerer Aufwand beim Aufbau der Infrastruktur. Zum generischen Pfad für DME ergeben sich in der Bewertung für MEM aus Angebotsicht keine Unterschiede.

### Fazit

Im Bereich leichte Nutzfahrzeuge sticht vor allem CombiFuel\_#1.1 heraus, da der Pfad eher keiner MEM im Nachfragebereich bedarf und auch ökologisch-systemisch insgesamt am besten, und damit besser als die generischen Pfade, abschneidet. Der Nachteil liegt hier in der hohen Notwendigkeit für MEM in der Angebotsinfrastruktur. C3Mobility\_#2 schneidet ähnlich wie der generische Pfad ab. Wegen der guten Alternativen wäre aber auch bei den Verbundpfaden kein Pfad für MEM zu empfehlen.

**Bereich schwere Nutzfahrzeuge:****Tabelle 5-31** Bewertungsübersicht Markteinführung: Bereich schwere Nutzfahrzeuge

Kraftstoffpfad		C3Mobility_#1.2	E2Fuels_#3.1	FlexDME_#1	SynLink_#1.1	SynLink_#1.2	SynLink_#1.3	
								Methanol
Kraftstoff								
1) Wie sinnvoll sind MEM aus ökologisch-systemischer Sicht?	1.1) Sinnhaftigkeit von MEM aus systemischer Sicht	Wie weit ist die alternative Technologie in unterschiedlichen Bereichen durchschnittlich entwickelt (gemessen in Technology Readiness Level (TRL))?	-2	-2	-2	-2	-2	-2
		Wie gut kann die alternative Technologie die Mobilitäts- und Transportbedürfnisse erfüllen?	-4	-4	-4	-4	-4	-4
		Gesamt 1.1	-3	-3	-3	-3	-3	-3
	1.2) Sinnhaftigkeit eines MEM zum Schutz der Ressourcen	Wirkungsgrad der Herstellung	+1	-1	0	0	0	0
		C-Ausnutzungsgrad (Zielfuel)	+4	+4	0	0	0	+2
		C-Ausnutzungsgrad (Summe der Elemente)	+3	+2	-4	+3	+1	+2
		Flächenverbrauch	-3	-4	-3	-4	-4	-4
		Gesamt 1.2	+1	0	-2	0	-1	0
	<b>Gesamt 1</b>		<b>-1</b>	<b>-2</b>	<b>-3</b>	<b>-2</b>	<b>-2</b>	<b>-2</b>

Kraftstoffpfad			C3Mobility_#1.2	E2Fuels_#3.1	FlexDME_#1	SynLink_#1.1	SynLink_#1.2	SynLink_#1.3
Kraftstoff			Methanol	30 % <sub>Vol</sub> OME+ 70 % <sub>Vol</sub> fossiler Diesel	DME	20 % <sub>Vol</sub> NT-FT-Diesel + 80 % <sub>Vol</sub> fossiler Diesel	Diesel	Diesel
2) Kann aus nachfrage- seitiger Sicht auf MEM verzichtet werden?	2.1) Bezahlbarkeit	Veränderung der Ausgaben der privaten Haushalte gemessen an den Konsumausgaben	-1	-1	-1	-1	-1	-1
		Veränderung der Produktionskosten	-2	-2	-2	-1	-3	-3
		<b>Gesamt 2</b>	<b>-2</b>	<b>-2</b>	<b>-2</b>	<b>-1</b>	<b>-2</b>	<b>-2</b>
3) Kann aus angebots- seitiger Sicht auf MEM verzichtet werden?	3.1) Upstream	Wie kompatibel ist der Kraftstoffpfad mit bestehender Infrastruktur zur Herstellung synthetischer Kraftstoffe?	+1	-2	+1	-1	-1	-1
		Wie groß ist der Bedarf an Koppelprodukten der Herstellung?	-4	-4	+3	+2	+2	+4
		<b>Gesamt 3.1</b>	<b>0</b>	<b>-3</b>	<b>+2</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>
	3.2) Midstream	Wie kompatibel ist der Kraftstoffpfad mit bestehender Infrastruktur zum Transport und der Betankung?	-1	-1	-1	+4	+4	+4
	3.3) Downstream	Wie kompatibel ist der Kraftstoffpfad mit der bestehenden Fahrzeugflotte?	0	0	-4	+3	+2	+2
		Wie kompatibel ist der Kraftstoff mit bestehenden Normen / Regularien?	-3	-2	+1	+3	+4	+3
		<b>Gesamt 3.3</b>	<b>-2</b>	<b>-1</b>	<b>-2</b>	<b>+3</b>	<b>+3</b>	<b>+3</b>
	<b>Gesamt 3</b>		<b>-1</b>	<b>-2</b>	<b>0</b>	<b>+2</b>	<b>+2</b>	<b>+2</b>

### 1) Wie sinnvoll sind MEM aus ökologisch-systemischer Sicht?

Im Bereich schwere Nutzfahrzeuge gibt es nach theoretischen Gesichtspunkten die Möglichkeit, alle Anwendungen mit Wasserstofffahrzeugen abzudecken, wie in Kapitel 3.7 in Tabelle 3-17 beschrieben ist. Entwicklungsbedarf besteht hier allerdings noch bei der Infrastruktur. Aus systemischer Sicht sind also keine MEM sinnvoll. Der Bereich schwere Nutzfahrzeuge hat deshalb keine Priorität bei der Einführung von MEM für synthetische Kraftstoffe. Bezogen auf den Ressourcenverbrauch wäre der Pfad C3Mobility\_1.2 mit dem Kraftstoff Methanol zu empfehlen, da hier sowohl die Effizienz im Vergleich am höchsten ist, als auch die stoffliche Nutzung des Kohlenstoffs vollständiger ist und MEM deshalb weniger schlecht erscheinen. Beim Vergleich mit dem generischen Pfad zu Methanol schneidet C3Mobility\_1.2 ebenfalls leicht besser ab. Eine hohe stoffliche Nutzung kann ebenfalls im Pfad E2Fuels\_#3.1 mit einem Kraftstoffblend aus OME und fossilem Diesel erreicht werden. Deshalb ist dieser Pfad, bezogen auf die Ressourceneffizienz, bedingt zu empfehlen und schneidet besser ab als der generische Dieseldieselkraftstoff. Die Dieseldieselkraftstoffpfade SynLink\_#1.2 und SynLink\_#1.3 schneiden im Mittel ähnlich ab wie der generische Pfad für Dieseldieselkraftstoff. Bezogen auf das Zielfuel ist mit diesen Pfaden eine leicht höhere C-Ausbeute zu erreichen. Auf die Summe der Elemente gerechnet, schneidet der Pfad dagegen schlechter ab. Ein ähnliches Ergebnis ergibt sich für das Blend von synthetischem Diesel in fossilem Diesel im Pfad SynLink\_#1.1. Dieser Pfad schneidet bezogen auf die C-Ausbeute für die Summe der Elemente allerdings besser ab als der generische Pfad. Die Effizienz ist, im Vergleich, für E2Fuels\_#3.1 am schlechtesten und auch aus ökologisch-systemischer Sicht sind keine MEM für diesen Pfad zu empfehlen. Die insgesamt schlechteste Wertung, bezogen auf die Sinnhaftigkeit von MEM aus ökologisch-systemischer Sicht, besitzt der Pfad FlexDME\_#1.

### 2) Kann aus nachfrageseitiger Sicht auf MEM verzichtet werden?

Die Belastungen für Verbrauchende und die Produktion steigen für alle Kraftstoffpfade, wobei die Pfade SynLink\_#1.2 und SynLink\_#1.3 mit Dieseldieselkraftstoff als Produkt zu einer noch höheren Belastung führen würden als die weiteren Kraftstoffpfade, die im Bereich schwere Nutzfahrzeuge zum Vergleich stehen. Das Kraftstoffblend aus synthetischem Dieseldieselkraftstoff und fossilem Dieseldieselkraftstoff führt dagegen zu geringeren Kosten bezogen auf die Produktion. Auf MEM könnte deshalb für keinen Kraftstoffpfad im Bereich schwere Nutzfahrzeuge verzichtet werden.

### 3) Kann aus angebotsseitiger Sicht auf MEM verzichtet werden?

Bei der Infrastruktur ist besonders der Dieseldieselkraftstoff im Vorteil, der im Bereich schwere Nutzfahrzeuge durch die Synlink-Kraftstoffpfade abgebildet wird. Mit Dieseldieselkraftstoff kann die bestehende Infrastruktur weitestgehend genutzt werden. Die Kraftstoffpfade SynLink\_#1.1 bis 1.3 bedürfen aber einer leicht größeren Anpassung der Infrastruktur als der generische Pfad. Im Upstreambereich schneidet DME am besten ab, und ist bezogen auf Infrastrukturimplikationen im Upstreambereich ähnlich vorteilhaft wie der generische Pfad für Dieseldieselkraftstoff. Im Midstream- und Downstreambereich sind für diesen Pfad allerdings größere Anpassungen der Infrastruktur notwendig, weshalb MEM vielleicht notwendig wären. Der Pfad E2Fuels\_#3.1 mit OME als Kraftstoff wäre wegen großer Anpassungen der Infrastruktur dagegen nicht ohne MEM in den Markt zu führen. Auch der Pfad C3Mobility\_#1.2 mit Methanol als Kraftstoff bedarf

einiger Anpassungen der Infrastruktur und damit der Flankierung durch MEM, auch wenn er im Downstream-Bereich leicht besser abschneidet als der generische Pfad zu Methanol.

### Fazit

Im Bereich schwere Nutzfahrzeuge ergeben sich größtenteils ähnliche Ergebnisse wie bei den generischen Pfaden. C3Mobility\_#1.2 hat eine leicht bessere Ressourceneffizienz, wie der generische Pfad. Das OME-Diesel-Blend im Pfad E2Fuels\_#3.1 kann dagegen in keinem Kriterium überzeugen und wäre deshalb für MEM nicht zu empfehlen. Insgesamt ist durch die schon recht weit entwickelten Alternativen dennoch wahrscheinlich kein MEM in diesem Bereich zu empfehlen.

**Bereich Schifffahrt:****Tabelle 5-32** Bewertungsübersicht Markteinführung: Bereich Schifffahrt

Kraftstoffpfad		C3Mobility_#1.1	E2Fuels_#1.1	E2Fuels_#2.1	ISystem4EFuel_#1.1	ISystem4EFuel_#2.1	MethQuest_#5	PlasmaFuel_#1	SynLink_#2.1	
Kraftstoff		Methanol	LNG	Methanol	30 %vol OME + 70 %vol fossiler Diesel	30 %vol HVO + 70 %vol fossiler Diesel	LNG	Diesel	Methanol	
1) Wie sinnvoll sind MEM aus ökologisch-systemischer Sicht?	1.1) Sinnhaftigkeit von MEM aus systemischer Sicht	Wie weit ist die alternative Technologie in unterschiedlichen Bereichen durchschnittlich entwickelt (gemessen in Technology Readiness Level (TRL))?	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	
		Wie gut kann die alternative Technologie die Mobilitäts- und Transportbedürfnisse erfüllen?	+2	+2	+2	+2	+2	+2	+2	+2
		Gesamt 1.1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1
	1.2) Sinnhaftigkeit eines MEM zum Schutz der Ressourcen	Wirkungsgrad der Herstellung	+1	0	0	k.A.	k.A.	+1	-3	0
		C-Ausnutzungsgrad (Zielfuel)	+4	+4	+4	k.A.	k.A.	+4	-1	+4
		C-Ausnutzungsgrad (Summe der Elemente)	+3	+3	+2	k.A.	k.A.	+4	-4	+3
		Flächenverbrauch	-3	-3	-3	k.A.	k.A.	-3	-4	-4
		Gesamt 1.2	+1	+1	+1	k.A.	k.A.	+2	-3	+1
	<b>Gesamt 1</b>		<b>+1</b>	<b>+1</b>	<b>+1</b>	<b>k.A.</b>	<b>k.A.</b>	<b>+2</b>	<b>-1</b>	<b>+1</b>



Kraftstoffpfad			C3Mobility_#1.1	E2Fuels_#1.1	E2Fuels_#2.1	ISystem4EFuel_#1.1	ISystem4EFuel_#2.1	MethQuest_#5	PlasmaFuel_#1	SynLink_#2.1
Kraftstoff			Methanol	LNG	Methanol	30 %Vol OME + 70 %Vol fossiler Diesel	30 %Vol HVO + 70 %Vol fossiler Diesel	LNG	Diesel	Methanol
2) Kann aus nachfrage-seitiger Sicht auf MEM verzichtet werden?	2.1) Bezahlbarkeit	Veränderung der Ausgaben der privaten Haushalte gemessen an den Konsumausgaben	-1	-1	-1	k.A.	k.A.	-1	-1	-1
		Veränderung der Produktionskosten	-1	-1	-1	k.A.	k.A.	-1	-2	-1
		<b>Gesamt 2</b>	<b>-1</b>	<b>-1</b>	<b>-1</b>	<b>k.A.</b>	<b>k.A.</b>	<b>-1</b>	<b>-2</b>	<b>-1</b>
3) Kann aus angebotsseitiger Sicht auf MEM verzichtet werden?	3.1) Upstream	Wie kompatibel ist der Kraftstoffpfad mit bestehender Infrastruktur zur Herstellung synth. Kraftstoffe?	+1	-1	+1	-1	+1	-1	+1	-1
		Wie groß ist der Bedarf an Koppelprodukten der Herstellung?	-4	-4	-4	-4	+4	-4	+4	-4
		<b>Gesamt 3.1</b>	<b>0</b>	<b>-2</b>	<b>0</b>	<b>-2</b>	<b>+2</b>	<b>-2</b>	<b>+2</b>	<b>-2</b>
	3.2) Midstream	Wie kompatibel ist der Kraftstoffpfad mit bestehender Infrastruktur zum Transport und der Betankung?	-1	+4	-1	-2	+3	+4	+4	-1
	3.3) Downstream	Wie kompatibel ist der Kraftstoffpfad mit der heutigen Fahrzeugflotte?	0	0	0	+2	+3	0	+4	0
		Wie kompatibel ist der Kraftstoff mit bestehenden Normen / Regularien?	+1	+4	+1	-2	+3	+4	+3	+1
		<b>Gesamt 3.3</b>	<b>+1</b>	<b>+2</b>	<b>+1</b>	<b>0</b>	<b>+3</b>	<b>+2</b>	<b>+4</b>	<b>+1</b>
	<b>Gesamt 3</b>	<b>0</b>	<b>+1</b>	<b>0</b>	<b>-1</b>	<b>+3</b>	<b>+1</b>	<b>+3</b>	<b>-1</b>	

### 1) Wie sinnvoll sind MEM aus ökologisch-systemischer Sicht?

In der Schifffahrt ist der Entwicklungsstand von alternativen Technologien nur teilweise bei kleineren Schiffen und geringeren Entfernungen weit fortgeschritten und auch die Abdeckung der Mobilitätsbedürfnisse ist aus heutiger Sicht nicht vollständig, wie in Kapitel 3.7 in Tabelle 3-17 beschrieben. In der Schifffahrt wäre es deshalb aus systemischer Sicht sinnvoll, MEM einzuführen. Konkret bezogen auf die zum Vergleich stehenden Kraftstoffpfade und ihre Ressourceneffizienz, fällt der Kraftstoffpfad PlasmaFuel\_#1, mit dem synthetischer Dieselmotorkraftstoff produziert werden kann, auf. Dieser ist hinsichtlich des Wirkungsgrades und der C-Ausbeute deutlich schlechter als die Vergleichspfade und wäre deshalb aus ökologisch-systemischer Sichtweise nicht zu empfehlen. Am besten schneidet MethQuest\_#5 mit Methan als Kraftstoff ab. Bei diesem Pfad sind Wirkungsgrad und C-Ausbeute im direkten Vergleich am höchsten, und auch der Flächenverbrauch schneidet nicht ganz so schlecht ab. Bezogen auf die Ressourceneffizienz wäre MethQuest\_#5 deshalb zu empfehlen, und aus ökologisch-systemischer Perspektive erscheint für diesen Pfad die Notwendigkeit für MEM am stärksten gegeben, auch wenn die Unterschiede zu den anderen Pfaden, bis auf PlasmaFuel\_#1, nicht ganz so groß sind. Alle Pfade, bis auf PlasmaFuel\_#1, haben eine höhere Ressourceneffizienz als generischer Diesel und MEM wären deshalb, bezogen auf den Ressourcenverbrauch, sinnvoll. Insgesamt wären aus ökologisch-systemischer Perspektive MEM für alle Pfade, bis auf Plasmafuel\_#1, zu empfehlen.

### 2) Kann aus nachfrageseitiger Sicht auf MEM verzichtet werden?

Die Belastungen für Verbrauchende und die Produktion sind für den Bereich Schifffahrt bei fast allen Kraftstoffpfaden nicht so stark ausgeprägt, aber eine Steigerung der Kosten wird in allen Pfaden festgestellt. Deshalb wären für alle Kraftstoffpfade MEM notwendig. Höher fallen die Belastungen für die Produktion für den Pfad PlasmaFuel\_#1 aus, der deshalb aus Nachfragesicht nicht zu empfehlen wäre, da er MEM mehr als die anderen Pfade benötigen würde.

### 3) Kann aus angebotsseitiger Sicht auf MEM verzichtet werden?

Bei der Infrastruktur ist besonders der Dieselmotorkraftstoff im Vorteil, der im Bereich der Schifffahrt in den Verbundpfaden neben Plasma\_Fuel\_#1 auch durch ISystem4EFuel\_#2.2 abgebildet wird und genauso kompatibel ist, wie der generische Pfad für Dieselmotorkraftstoff in der Schifffahrt. Bei ISystem4EFuel\_#2.2 ist dabei zu beachten, dass es sich um ein Blend aus HVO und fossilem Dieselmotorkraftstoff handelt. Neben Dieselmotorkraftstoff kann auch mit Methan die bestehende Infrastruktur genutzt werden, wie bei E2Fuels\_#1 und MethQuest\_#5, die ebenfalls keine Unterschiede zum generischen Pfad für Methan aufweisen. Alle genannten Pfade bedürften deshalb aus Angebotssicht keinerlei MEM. Der Pfad E2Fuels\_#2.1 und C3Mobility\_#1.1 mit Methanol weisen ebenfalls keine Unterschiede zum generischen Pfad für Methanol auf. Der andere Methanolfpfad SynLink\_#2.1 bedürfte dagegen größerer Anpassungen und wäre deshalb mit einer Notwendigkeit für MEM verbunden, genauso wie ISystem4EFuel\_#1.1 mit einem Blend aus synthetischem OME und fossilem Dieselmotorkraftstoff.

Fazit

Im Bereich Schifffahrt haben alle Pfade bis auf Plasma\_Fuel\_#1 eine leicht bessere Ressourceneffizienz als ihre generischen Pendanten. Sonst sind die Unterschiede gering bei diesen Pfaden. Der Pfad PlasmaFuel\_#1 kann dagegen nicht überzeugen, da er sowohl aus ökologisch-systemischer Sicht, als auch nachfrageseitig deutlich schlechter abschneidet, als der generische Pfad und auch insgesamt nicht zu empfehlen ist. Über alle Kategorien sind am ehesten die beiden Pfade mit LNG (E2Fuels\_#1.1 und MethQuest\_#5) für MEM, deren Notwendigkeit sich aus dem Nachfragebereich ergibt, zu empfehlen.

**Bereich Luftfahrt:****Tabelle 5-33** Bewertungsübersicht Markteinführung: Bereich Luftfahrt

Kraftstoffpfad			KEROSYN100_#1	PowerFuel_#1.1	PowerFuel_#2.1
Kraftstoff			Kerosin	Kerosin	Kerosin
1) Wie sinnvoll sind MEM aus ökologisch-systemischer Sicht?	1.1) Sinnhaftigkeit von MEM aus systemischer Sicht	Wie weit ist die alternative Technologie in unterschiedlichen Bereichen durchschnittlich entwickelt (gemessen in Technology Readiness Level (TRL))?	0	0	0
		Wie gut kann die alternative Technologie die Mobilitäts- und Transportbedürfnisse erfüllen?	+2	+2	+2
		Gesamt 1.1	+1	+1	+1
	1.2) Sinnhaftigkeit MEM zum Schutz der Ressourcen	Wirkungsgrad der Herstellung	0	k.A.	k.A.
		C-Ausnutzungsgrad (Zielfuel)	0	k.A.	k.A.
		C-Ausnutzungsgrad (Summe der Elemente)	+3	k.A.	k.A.
		Flächenverbrauch	-4	k.A.	k.A.
		Gesamt 1.2	0	k.A.	k.A.

Kraftstoffpfad			KEROSYN100_#1	PowerFuel_#1.1	PowerFuel_#2.1
Kraftstoff			Kerosin	Kerosin	Kerosin
		<b>Gesamt 1</b>	+1	k.A.	k.A.
2) Kann aus nachfrage-seitiger Sicht auf MEM verzichtet werden?	2.1) Bezahlbarkeit	Veränderung der Ausgaben der privaten Haushalte gemessen an den Konsumausgaben	-1	k.A.	k.A.
		Veränderung der Produktionskosten	-1	k.A.	k.A.
		<b>Gesamt 2</b>	-1	k.A.	k.A.
3) Kann aus angebotsseitiger Sicht auf MEM verzichtet werden?	3.1) Upstream	Wie kompatibel ist der Kraftstoffpfad mit bestehender Infrastruktur zur Herstellung synthetischer Kraftstoffe?	-1	+1	+1
		Wie groß ist der Bedarf an Koppelprodukten der Herstellung?	-4	+4	-4
		<b>Gesamt 3.1</b>	-2	+2	0
	3.2) Midstream	Wie kompatibel ist der Kraftstoffpfad mit bestehender Infrastruktur zum Transport und der Betankung?	+3	+3	+3
	3.3) Downstream	Wie kompatibel ist der Kraftstoffpfad mit der bestehenden Fahrzeugflotte?	+4	+4	+4
		Wie kompatibel ist der Kraftstoff mit bestehenden Normen / Regularien?	+1	+4	+3
		<b>Gesamt 3.3</b>	+3	+4	+4
		<b>Gesamt 3</b>	+1	+3	+2

### 1) Wie sinnvoll sind MEM aus ökologisch-systemischer Sicht?

In der Luftfahrt ist der Entwicklungsstand von alternativen Technologien weitgehend im Bereich von Versuchsaufbauten im Labor, wie in Kapitel 3.7 in Tabelle 3-17 beschrieben. Auch können nicht alle Bereiche der Mobilitätsbedürfnisse abgedeckt werden. Deshalb wären hier MEM aus systemischer Sicht sinnvoll. Bezogen auf den Ressourcenverbrauch lässt sich aus den drei Kraftstoffpfaden für die Luftfahrt lediglich der Pfad KEROSyN100\_#1, der mittelmäßig abschneidet, bewerten. Vor allem die C-Ausbeute, bezogen auf das Zielfuel, ist hier nicht so hoch und er ist insgesamt, bezogen auf die Ressourceneffizienz, nur bedingt zu empfehlen. Im Vergleich zu den generischen Pfaden hat der Pfad KEROSyN100\_#1 eine höhere C-Ausbeute im Zielfuel. Insgesamt wäre es für diesen Pfad aus ökologisch-systemischer Perspektive deshalb sinnvoll, MEM einzuführen.

### 2) Kann aus nachfrageseitiger Sicht auf MEM verzichtet werden?

Die Belastungen für Verbrauchende und Produktion lassen sich ebenfalls nur bei KERO-SyN100\_#1 bewerten. Die Belastung steigt ähnlich stark, wie für den generischen Pfad zum 50 %-Blend von synthetischem Kerosin. Dennoch wären auch für diesen Pfad MEM aus Nachfrageperspektive notwendig.

### 3) Kann aus angebotsseitiger Sicht auf MEM verzichtet werden?

Von der Angebotsseite lassen sich alle drei Kraftstoffpfade bewerten. Hier fällt KERO-SyN100\_#1 durch einen nicht kommerziell verfügbaren Herstellungsprozess des Methanol-to-Jets auf, welches auch noch nicht für den Einsatz im Luftverkehr zertifiziert wurde. Bezogen auf die Infrastruktur besitzen deshalb die Fischer-Tropsch-Pfade PowerFuel\_#1.1 und #2.1 einen Vorteil bezüglich der aktuell schon weitgehend nutzbaren Infrastruktur. Der Pfad PowerFuel\_#1.1 fällt durch die Koppelprodukte Diesel und Benzin mit einem hohen Bedarf auf, welches eine zusätzliche Option für die Vermarktung birgt. Damit ist dieser Pfad aus Angebotssicht mit den geringsten Infrastrukturimplikationen verbunden. MEM wären dennoch für keinen der Kraftstoffpfade notwendig, da die Infrastruktur im Mid- und Downstreambereich weitgehend genutzt werden kann.

### Fazit

Insgesamt lässt sich im Bereich Luftfahrt festhalten, dass der Pfad KeroSyn100\_#1 ökologisch-systemisch überzeugen kann. Aus angebotsseitiger Sicht schneidet er allerdings schlechter ab, als der generische Pfad. Dennoch wäre er für MEM, deren Notwendigkeit sich aus Nachfragesicht ergäbe, zu empfehlen.

## 6 Szenarien zur Einordnung in den gesamtsystemischen Kontext

### 6.1 Beschreibung der Rahmen-Szenarien und Storylines

Ziel der Szenarienmodellierungen ist eine vergleichende Analyse verschiedener Technologieoptionen und -pfade zur Dekarbonisierung des Verkehrs- und Energiesektors, die geeignet sind, bis 2045 in Deutschland Klimaneutralität zu erreichen. Im Rahmen von BEniVer wurde hierzu eine Reihe von Storylines als Basis für die Szenarien entwickelt. Die erste führt zu einem Referenz-Szenario („REF“) mit einer Treibhausgasreduktion von 80 % (THG80). Die weiteren Szenarien gehen von der Reduktion der Treibhausgase um 100 % (THG100) und der Erfüllung der Ziele des Pariser Klimaschutzabkommens aus. Drei alternative Technologie-Szenarien sollen dabei die Eckpunkte zukünftiger Entwicklungen im Verkehr ausleuchten:

#### Szenario Direktelektrisch (DEL):

Mobilität wird weitgehend über batterieelektrische Antriebe abgewickelt, insbesondere im Personen- und Lieferverkehr. Strombasierte Kraftstoffe werden nur im Langstrecken-Schwerlastverkehr, z.T. in der Schifffahrt und im Luftverkehr benötigt.

#### Szenario Wasserstoff (H<sub>2</sub>):

Mobilität wird weitgehend über elektrische Antriebe abgewickelt, dabei kommt der Strom zum Teil aus Batterien, aber auch aus Wasserstoffbrennstoffzellen. Die Option Wasserstoff wird vor allem dort gewählt, wo lange Strecken gefahren werden: im Pkw-Bereich, Lieferverkehr und Schwerlastverkehr. In der Luftfahrt wird auf Kurz- und Mittelstrecken ebenfalls Wasserstoff eingesetzt.

#### Szenario synthetische Kraftstoffe (PtX):

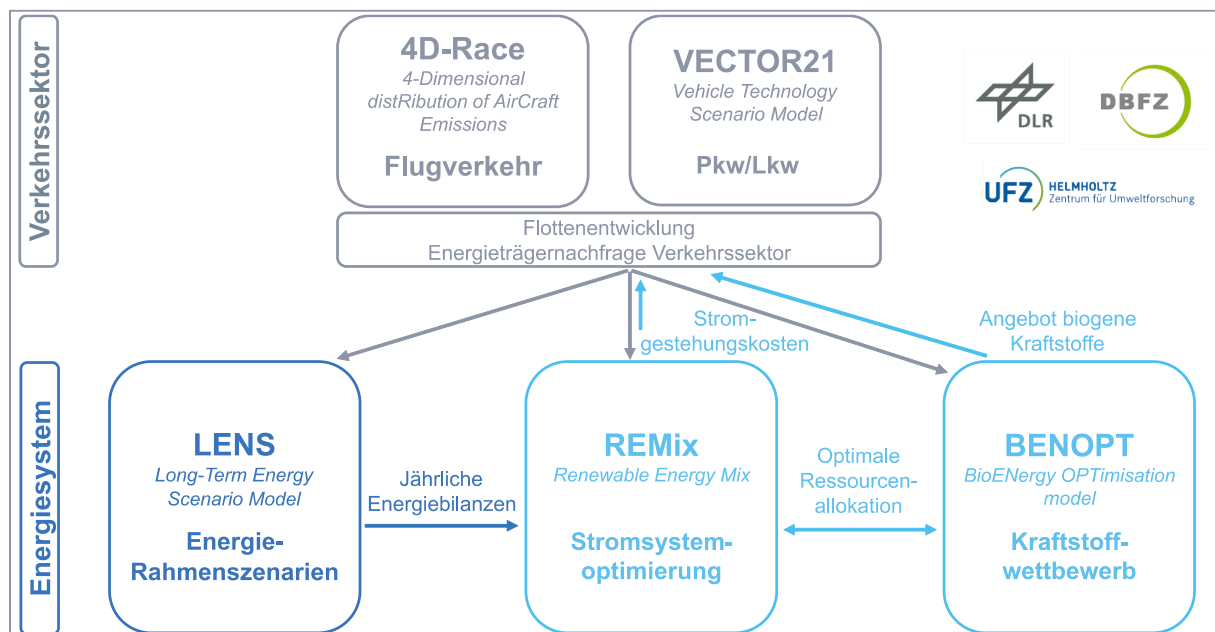
Hier werden, im Gegensatz zu den beiden vorherigen Szenarien, mehr Verbrennungsmotoren eingesetzt, die mit strombasierten Kraftstoffen angetrieben werden. Diese Kraftstoffe werden auch zur Defossilisierung der bestehenden Fahrzeugflotte genutzt. Der Luft- und Seeverkehr setzt verstärkt strombasierte Kraftstoffe ein.

### 6.2 Übersicht der Modelle

Aufgrund der großen Unterschiede der Verkehrsbereiche und des Energiesystems, wird für die Modellierung auf verschiedene, in Abbildung 6-1 dargestellte Modelle zurückgegriffen. Für die Modellierungen der Verkehrsbereiche werden die Modelle 4D-Race des DLR-Instituts für Flughafenwesen und VECTOR21 des DLR-Instituts für Fahrzeugkonzepte eingesetzt. Die Abbildung des Energiesystems übernehmen LENS und REMix (s. Kapitel 6.8) des DLR-Instituts für Vernetzte Energiesysteme, sowie BENOPT vom Helmholtz Zentrum für Umweltforschung (UFZ). Mit dem Modell LENS werden die Szenarien als jährliche Energiebilanzen mit dem Fokus auf die Integration der Nachfrageentwicklungen dargestellt. Das Modell REMix zoomt dann in die stündliche Energiebereitstellung, mit dem Schwerpunkt auf dem Stromsystem, und

optimiert die Kraftwerkseinsatzplanung und den notwendigen Zubau an Kapazitäten in regionaler Auflösung (Kraftwerke, Speicher, Netztransferkapazitäten, Elektrolyseure und PtL-Anlagen).

Das Deutsche Biomasseforschungszentrum (DBFZ) liefert die für unterschiedliche Nutzungen geeigneten Biomassepotenziale. Die Modelle BENOPT und REMix werden in einem iterativen Modellierungsansatz genutzt, um den Wettbewerb zwischen biobasierten und strombasierten Kraftstoffen abzubilden.



**Abbildung 6-1:** Übersicht der in BEniVer verwendeten makroskopischen Modelle sowie deren Verknüpfung untereinander (Verkehr und Energie)

## 6.3 Verkehrsbereichsübergreifende Annahmen

### Energieeffizienz

Eine ambitionierte Strategie zur Erhöhung der Energieeffizienz und zur Verringerung des Energiebedarfs ist ein wesentlicher Eckpfeiler der Energiewende. Jede nicht verbrauchte kWh Energie verringert die Anforderungen an das Energieversorgungssystem, den erforderlichen Ausbau der erneuerbaren Energien und damit die Risiken der Energiewende aufgrund der begrenzten Potenziale und ggf. Akzeptanz gegenüber Transformationsprozessen. Grundlage der Szenarien sind deshalb Annahmen zu deutlichen Effizienzverbesserungen und der dadurch resultierende Rückgang des Energiebedarfs in allen Nachfragebereichen. Diese orientieren sich an den Energiewende-Zielen der Bundesregierung bzw. an sich darauf beziehenden Langfristszenarien zur Energiewende.

### Mobilitätsverhalten

Um die Analysen auf die Wirkungen der unterschiedlichen Antriebstechnologien fokussieren zu können, wird angenommen, dass sich das heutige Mobilitätsverhalten nicht verändert. Es wird also nicht von einer Verkehrsvermeidung, -verlagerung bzw. -reduktion ausgegangen.

Damit zeigen die Analysen auch die Herausforderungen, die bei der Defossilisierung des Verkehrssektors aufkommen, wenn keine Vermeidung und Verlagerung erreicht wird.

### **Nachfrageentwicklungen**

Im Rahmen von BEniVer wurden zukünftige Nachfragen nach Endenergien für den Straßen- und den Flugverkehr mit eigenen Simulationen für die definierten Szenarien abgeschätzt. Für alle anderen Bereiche, insbesondere Schiffs- und Bahnverkehr sowie die stationären Bereiche Industrie, Haushalte und GHD (Gewerbe, Handel, Dienstleistungen), wurden Informationen aus den im Auftrag des BMWK kürzlich veröffentlichten Langfristszenarien für Deutschland übernommen (siehe [www.langfristszenarien.de](http://www.langfristszenarien.de)). Davon ausgehend und ergänzend unter Nutzung von EU28-Szenarien aus der Studie „A Clean Planet for all“ der Europäischen Kommission aus dem Jahr 2018, wurden für alle europäischen Länder konsistente Nachfrage-Szenarien ermittelt. Diese wurden als Rahmenszenarien in einer einheitlichen Datenstruktur des Szenariomodells LENS über eine geeignete Schnittstelle für die Parametrierung der Systemmodellierung mit dem REMix-Modell genutzt.

### **Corona-Effekt**

Die Effekte der COVID-19-Pandemie werden in den Zulassungszahlen im Straßenverkehr und bei der Entwicklung der Nachfrage im Flugverkehr berücksichtigt, in der Nachfrage nach Strom und Wärme jedoch nicht.

### **EE-Ressourcen**

Die Herstellung von strombasierten Kraftstoffen benötigt die zusätzliche Bereitstellung von erneuerbarem Strom. Zu einem geringen Teil können dafür bestehende Anlagen genutzt werden, die ggf. besser ausgelastet werden, indem eine Abschaltung in Zeiten einer hohen Erzeugung (Starkwind, großflächige Sonneneinstrahlung) vermieden wird und dieser Strom für die Herstellung von Kraftstoffen genutzt wird.

Die verfügbaren Ressourcen werden mit dem Tool REMix-EnDat aus einer Analyse der meteorologischen Daten (Windgeschwindigkeiten und Sonneneinstrahlung) und der geographischen Verfügbarkeit entsprechender Flächen abgeleitet. Diese Analyse wurde gemeinsam mit dem Projekt MENA-Fuels durchgeführt und liegt für Europa und die MENA-Region (Middle East, North Africa) vor. In den endgültigen Rechnungen wurde jedoch auf die Ausbauszenarien des Netzentwicklungsplans zurückgegriffen, um eine bessere Vergleichbarkeit mit anderen Studien zu ermöglichen. Die dort für 2045 erreichten Kapazitäten wurden als maximales Potenzial gesetzt.



## 6.4 Straßenverkehr

### Ziele der Fahrzeugmarkt-Simulationen

Übergeordnetes Ziel der Modellierungen ist es, verschiedene Technologieoptionen zur Defossilisierung des Straßenverkehrs zu analysieren, mit denen bis 2045 Klimaneutralität erreicht werden kann. Die Szenarien zeigen auf, welche Rolle synthetische Kraftstoffe – im Zusammenspiel mit anderen Technologien – hierbei einnehmen können. Die Modellierungen liefern des Weiteren eine Abschätzung des zukünftigen Bedarfs synthetischer Kraftstoffe im Straßenverkehr. Hier werden zusätzlich zu den Basisfällen („Core Analysis“) verschiedene Sensitivitäten gerechnet, um die Robustheit und die Treiber der Nachfrage nach synthetischen Kraftstoffen zu analysieren. Schließlich werden die Randbedingungen analysiert, um synthetische Kraftstoffe entsprechend in den Markt zu bringen.

### Simulationstool VECTOR21

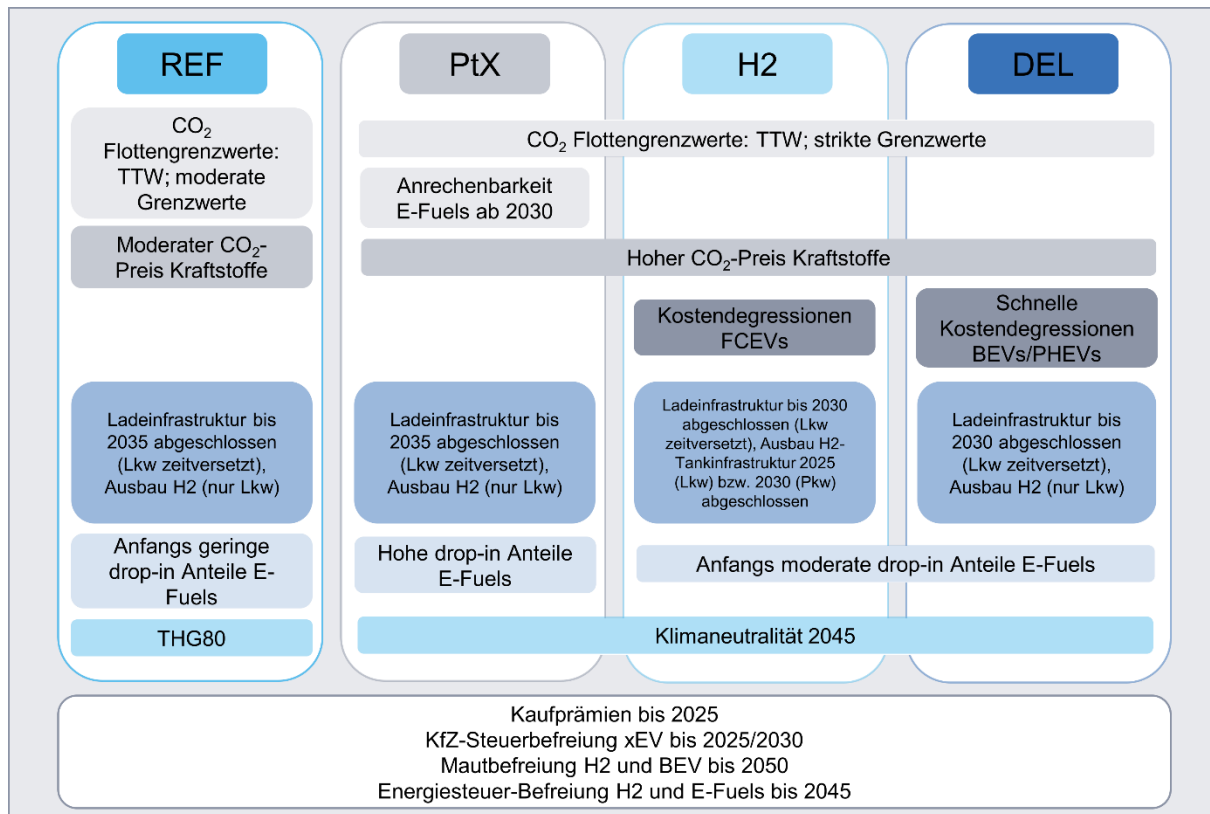
Die Modellierung des Pkw- und Lkw-Markts wird mit dem Simulationstool VECTOR21 (Vehicle Technology Scenario Model) des DLR-Instituts für Fahrzeugkonzepte [DLR Verkehr 2022] vorgenommen. Das Tool simuliert die Marktentwicklung von Fahrzeugtechnologien der neu zugelassenen Pkw und Lkw im Rahmen von Szenarien bis 2050. Auf Basis der simulierten Neuzulassungsstrukturen wurden die Bestandsentwicklung sowie die daraus resultierende Kraftstoffnachfrage des Straßenverkehrs abgeleitet.

Die in VECTOR21 modellierten Antriebskonzepte unterscheiden sich vor allem im Grad der Elektrifizierung und den dafür verbauten technischen Komponenten sowie deren Dimensionierung. Konkret werden bei der Modellierung des Pkw-Markts folgende Antriebsstränge unterschieden: Benzinfahrzeug (Gasoline, G), Dieselfahrzeug (Diesel, D), Plug-In-Hybridfahrzeug (Plug-In Hybrid Electric Vehicle, PHEV), Elektrofahrzeug (Battery Electric Vehicle, BEV), Brennstoffzellenfahrzeug (Fuel-Cell Electric Vehicle, FCEV). Es werden für jeden Antriebsstrang jeweils drei Fahrzeugsegmente (Mini/Kleinwagen, Mittelklasse, Oberklasse) modelliert.

Die Modellierung des deutschen Lkw-Markts unterscheidet auf der Angebotsseite folgende Antriebskonzepte: Dieselantrieb (Internal Combustion Engine Diesel (ICE-D)), Erdgasantrieb (Compressed Natural Gas (CNG), Liquefied Natural Gas (LNG)), unterschiedliche Hybridantriebe (Mild-Hybrid-Electric Vehicle (MHEV), Full-Hybrid-Electric Vehicle (FHEV), Plug-In-Hybrid-Electric Vehicle (PHEV)) sowie batterieelektrische und Brennstoffzellen-Antriebe. Die Modellierung von leichten und schweren Nutzfahrzeugen unterscheidet Fahrzeugkategorien nach zulässigem Gesamtgewicht (jeweils bis 3,5 t / 7,5 t / 12 t / 18 t / 26 t und 40 t).

### Übersicht der Pkw- / Lkw-Szenarien

Die technologische Entwicklung der Fahrzeugneuzulassungen in Deutschland hängt vor allem von der zukünftigen Ausgestaltung der CO<sub>2</sub>-Emissionsnormen für neue Fahrzeuge, dem Ausbau des Tank- und Ladesäulennetzes, den Technologiekosten der Fahrzeuge, den Energiepreisen sowie von Förderinstrumenten, wie zum Beispiel der Umweltprämie, ab. Das folgende Diagramm zeigt eine Übersicht über die wichtigsten Faktoren der Fahrzeugmarktentwicklung, vergleichend für die Szenarien REF, PtX, H2 und DEL.



**Abbildung 6-2:** Übersicht der wichtigsten Rahmenannahmen der Pkw- und Lkw-Szenarien in VECTOR21

### Ausgestaltung der Szenarien: Annahmen

Wichtigster Hebel für die Marktentwicklung von Pkw- und Lkw-Technologien sind die CO<sub>2</sub>-Emissionsnormen, geregelt in Verordnung [EU 2019/631]. Dem REF-Szenario wird die aktuelle Fassung der Verordnung EU 2019/631 zu Grunde gelegt, die die Ausgestaltung der Emissionsnormen bis 2030 festlegt. Diese sieht eine Emissionsminderung von 37,5 % gegenüber 2021 vor. Für die Modellierung wird wie in Tabelle 6-1 dargestellt angenommen, dass in Deutschland zugelassene Pkw diesen Wert zwei Jahre früher erreichen (eigene Annahme), da die Automobilindustrie aktuell davon ausgeht, dass diese Reduktionziele in anderen europäischen Ländern erst später erreicht werden können. Schon 2021 wurden in Deutschland überdurchschnittlich viele BEVs/PHEVs zugelassen (14 % BEVs und 12 % PHEVs gegenüber 10 % und 9 % jeweils in der EU insgesamt). Für die Zeit nach 2030 orientieren sich die zugrunde gelegten Grenzwerte am Ziel, bis 2050 die Treibhausgasemissionen im Straßenverkehr um 80 % gegenüber 1990 zu reduzieren (konsistent mit der Definition des REF-Szenarios).

Die Technologie-Szenarien DEL, PtX und H2 reflektieren den Vorschlag zur Änderung der Verordnung EU 2019/631 vom 14. Juli 2021 [EU 2021/0197]. Es wird eine Reduktion der Flottenemissionen bis 2030 um 55 % gegenüber 1990 angenommen. Auch in diesem Fall wird davon ausgegangen, dass die in Deutschland zugelassenen Pkw diesen Wert zwei Jahre früher erreichen (eigene Annahme), aufgrund der Einschätzung der Automobilindustrie, dass die Entwicklungen in anderen europäischen Ländern langsamer sein werden. Im PtX-Szenario ist

darüber hinaus die Anrechenbarkeit von strombasierten Kraftstoffen vorgesehen und somit die Möglichkeit, verbrennungsmotorische Fahrzeuge als Nullemissionsfahrzeuge zu bilanzieren, sofern für diese vom Fahrzeughersteller E-Fuel-Zertifikate gekauft werden.

**Tabelle 6-1:** Annahmen CO<sub>2</sub>-Emissionsnormen für Pkw, LNF und SNF

	REF	PtX	H2	DEL
<b>Pkw</b>	<p><b>2030:</b> -37,5 % (gemäß Verordnung EU 2019/631, in Kraft + Annahme, dass deutsche Neuzulassungen den 2030 Grenzwert zwei Jahre früher erreichen)</p> <p><b>Post-2030:</b> sukzessive Verschärfung der Grenzwerte auf -80 % bis 2040 (um bis 2050 THG80-Ziel zu erreichen)</p>	<p>Grenzwerte wie H2 und DEL</p> <p>Anrechenbarkeit E-Fuels: ab 2030 möglich bis zu 10 % der Neuwagenflotte</p>	<p><b>2028:</b> Reduktion der Flottenemissionen um 55 % gegenüber 2021 (gemäß Vorschlag zur Änderung der Verordnung EU 2019/631 vom 14. Juli 2021 + Annahme, dass deutsche Neuzulassungen den 2030 Grenzwert zwei Jahre früher erreichen)</p> <p><b>2034:</b> 0 g CO<sub>2</sub> (gemäß Vorschlag zur Änderung der Verordnung EU 2019/631 vom 14. Juli 2021 + Annahme, dass deutsche Neuzulassungen den 2035 Grenzwert ein Jahr früher erreichen)</p> <p>Keine Anrechenbarkeit E-Fuels möglich</p>	
<b>LNF und SNF</b>	<p><b>LNF 2030:</b> Reduktion Flottenemissionen um -31 % (Verordnung EU 2019/631; in Kraft)</p> <p><b>SNF 2030:</b> -30 % gegenüber 2021 (Verordnung [EU 2019/1242], in Kraft)</p> <p><b>LNF / SNF: Post-2030:</b> sukzessive Verschärfung der Grenzwerte, um bis 2050 THG80-Ziel zu erreichen (2040: -50 %, 2050: -80 %)</p>	<p>Grenzwerte wie H2 und DEL</p> <p>Anrechenbarkeit E-Fuels: ab 2030 unbeschränkt möglich</p>	<p><b>LNF 2030:</b> Reduktion der Flottenemissionen um -50 % (gemäß Vorschlag zur Änderung der Verordnung EU 2019/631 vom 14. Juli 2021)</p> <p><b>LNF 2035:</b> 0 g CO<sub>2</sub> LNF (gemäß Vorschlag zur Änderung der Verordnung EU 2019/631 vom 14. Juli 2021)</p> <p><b>SNF 2030:</b> -30% gegenüber 2021 (Verordnung EU 2019/1242; in Kraft)</p> <p><b>SNF 2035:</b> Reduktion der Flottenemissionen um 60 % gegenüber 2021</p> <p><b>2040:</b> 0 g CO<sub>2</sub> (konsistent mit ACEA Kommittent der europäischen Lkw OEMs [ACEA 2020])</p> <p>Keine Anrechenbarkeit E-Fuels für Neuzulassungen möglich</p>	

Weitere Annahmen für die vier Szenarien sind mit Fokus auf den Pkw-Markt in Tabelle 6-2 zusammengefasst.

**Tabelle 6-2:** Zentrale Annahmen der BEniVer-Szenarien für den Straßenverkehr

	REF	PtX	H2	DEL
E-Fuels: Beimischungsanteile	Ab 2035 <1 % bis 2045 10 %	Ab 2026 1 % schneller Hochlauf bis 2045 (>90 %)	Ab 2026 <1 % moderater Hochlauf bis 2045 >90 %	
E-Fuels: Spezifische CO <sub>2</sub> -Emissionen	Die Markteinführung im Straßenverkehr erfolgt v.a. über die THG-Quote (und den CO <sub>2</sub> -Preis Verkehr), nachdem nur mit erneuerbarem Strom produzierte E-Fuels als Erfüllungsoption möglich sind und insg. ca. 70 % CO <sub>2</sub> -Reduktion gegenüber fossilem Referenzkraftstoff eingehalten werden muss (siehe THG-Quotengesetz 2021 <sup>16</sup> , Entwürfe delegierte Rechtsakte Mai 2022).			
Anteil Biokraftstoffe	2020-2050: Benzin 3,7 %, Diesel 7,8 %			
H2 Tank- / Ladeinfrastruktur Pkw, leichte Nutzfahrzeuge	Ausbau des Ladesäulennetzes bis 2035 abgeschlossen; geringer Ausbau H <sub>2</sub> -Tankstellennetz	wie REF	Ausbau des notwendigen Ladesäulennetzes Infrastruktur bis 2030 abgeschlossen; Ausbau H <sub>2</sub> -Tankstellennetz bis 2030 abgeschlossen	Ausbau des notwendigen Ladesäulennetzes Infrastruktur bis 2030 abgeschlossen; geringer Ausbau der H <sub>2</sub> -Tankstellen
Pkw Technologiekosten (€2020)	Batterie: ca. 120 €/kWh bis 2030 [Avicenne Energy 2020] Brennstoffzellensystem: 58 €/kW bis 2050 <sup>17</sup>	wie REF	Batterie: ca. 120 €/kWh bis 2030 [Avicenne Energy 2020] Brennstoffzellensystem: 58 €/kW bis 2030 [James et al. 2018]	Batterie: ca. 70 €/kWh bis 2030 [BNEF 2020] Brennstoffzellensystem: 58 €/kW bis 2050 [James et al. 2018]
Umweltprämie	Prämien bis 2025 gemäß Ausgestaltung im März 2022 (z. B. bis zu 9.000 € für BEVs / FCEVs). Die mögliche Abschaffung der Kaufprämien für PHEVs wurde in den Szenarien nicht berücksichtigt.			
Anzahl neu zugelassener Pkw	2021: 2,6 Mio. (KBA) 2022: 2,8 Mio. (VDA-Prognose) 2025: 3,1 Mio.; 2030: 3 Mio.; 2045: 2,9 Mio. gemäß BDI Klimapfade 2.0 [Burchardt et al. 2021]			

<sup>16</sup> Kraftstoffinverkehrbringer sind seit 2015 verpflichtet, die CO<sub>2</sub>-Emissionen von Otto- und Dieselmotoren stufenweise zu senken. Bis 2030 müssen diese um 25 % reduziert werden. Dies kann u.a. durch die Beimischung von nachhaltigen Biokraftstoffen, Strom für E-Fahrzeuge und nachhaltige synthetische Kraftstoffe erfüllt werden. Geregelt in §37a Gesetz zum Schutz vor schädlichen Umwelteinwirkungen durch Luftverunreinigungen, Geräusche, Erschütterungen und ähnliche Vorgänge (Bundesimmissionsschutzgesetz – [BlmSchG 2022])

<sup>17</sup> Eigene Annahmen auf Grundlage von Lernkurven in [James et al. 2018]

Ein wichtiger Treiber des zukünftigen Bedarfs an synthetischen Kraftstoffen im Straßenverkehr sind die Entwicklungen der Fahrleistungen. Die Core-Szenarien legen zukünftige Fahrleistungen zugrunde, die keine Änderungen des heutigen Mobilitätsverhaltens annehmen; der analytische Fokus liegt auf der Modellierung der Rolle von Antriebstechnologien zur Defossilisierung des Straßenverkehrs. Es sollten dabei vor allem auch die Herausforderungen herausgearbeitet werden, die bei den geltenden Rahmenbedingungen und dem zu erwartenden hohen Zahlen an Bestandsfahrzeugen aufkommen, um die Verkehrsbereiche zu defossilisieren. Verkehrsvermeidung und Verlagerung können ebenfalls zur Verringerung des Kraftstoffbedarfs beitragen. Diese sind hier aber nicht betrachtet worden, weil dann die Effekte der unterschiedlichen Antriebstechnologien weniger trennscharf analysiert werden können. Die Fahrleistungen im Pkw-Bereich sind aufgrund der Corona-Pandemie deutlich zurückgegangen, was bei den Modellierungen berücksichtigt wird. Dieser Rückgang betraf den Güterverkehr nicht. Um den Effekt möglicher Reduktionen der Fahrleistungen auf den zukünftigen Kraftstoffbedarf abzubilden, werden Sensitivitätstests durchgeführt. Folgende Tabelle fasst die Annahmen bezüglich Fahrleistungen für Pkw und Lkw zusammen.

**Tabelle 6-3:** Annahmen der BEniVer-Szenarien in Bezug auf die Fahrleistung

Bereich	2020	2024	2025 - 2050
Pkw	2020-2023: Tatsächliche Fahrleistung im Jahr 2020, d.h. 578 Mrd. km [BMDV 2022]	648 Mrd. Fahrzeug-km [ITP 2021]	Konstante Fortschreibung der Fahrleistung von 2024
Leichte bzw. schwere Nutzfahrzeuge	Fahrleistungen 2020: 67 Mrd. km [BMDV 2022]	Leicht lineare Fortschreibung der Fahrleistungen ab 2020 (in Anlehnung an Verkehrsverflechtungsprognose 2030)	Wie 2024, weitere Fortschreibung
Sensitivitätstests	Pkw / SNF / LNF: + 10 % Fahrleistungssteigerung bis 2030		

Die folgende Tabelle enthält die wichtigsten Annahmen zu Entwicklungen der Energiepreise, die allen Szenarien gleichermaßen zugrunde gelegt werden (mit der Ausnahme der Entwicklung des CO<sub>2</sub>-Preises für fossile Kraftstoffe). Annahmen zu Deckungsbeiträgen für fossile Kraftstoffe an der Tankstelle oder Preisaufläge an Schnellladesäulen werden in dieser Tabelle nicht dargestellt. Diese werden jedoch bei der Modellierung berücksichtigt.

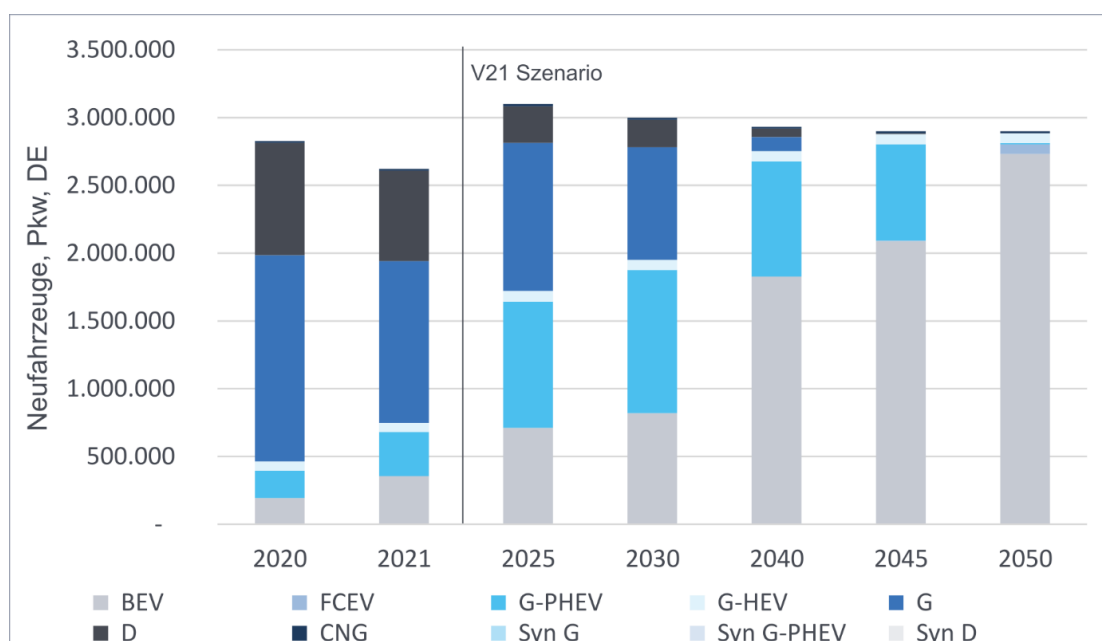
**Tabelle 6-4:** Annahmen für Energiepreise (in €2020, soweit nicht anders angegeben)

Energie-träger	Preis-bestandteil	Werte
Fossiles Benzin und fossiler Diesel	Rohölpreis	Prognosen basierend auf dem Szenario „Sustainable Development“, in USD2020 [IEA 2021d]: 2021: 59 USD / barrel (Marktpreis Brent) 2030: 56 USD / barrel 2045: 50 USD / barrel
	Energiesteuer	Konstante Fortschreibung der geltenden nominalen Sätze im März 2022 (Annahme): Benzin: 0,65 €/l Diesel: 0,47 €/l
	CO <sub>2</sub> -Preis Verkehr	2021-2026: Gemäß gültigem Gesetz Post-2026: Annahmen THG100-Szenarien (PtX, H2 und DEL): 2030: 100 €/tCO <sub>2</sub> (REF: 80 €/tCO <sub>2</sub> ) 2040: 200 €/tCO <sub>2</sub> (REF: 100 €/tCO <sub>2</sub> ) 2045: 300 €/tCO <sub>2</sub> (REF: 200 €/tCO <sub>2</sub> )
Strom	Abnahmepreis Haushalte (Pkw)	Konstante Fortschreibung des durchschnittlichen realen Preises 2021: ca. 32 ct/kWh [BDEW 2022b]
	Abnahmepreis Industrie (Lkw)	ca. 21 ct/kWh [BDEW 2022b]
PtL	Netto Tankstellenpreis für FT Benzin / Diesel	Quelle: BEniVer - TÖA. Produktion DE. Generische H <sub>2</sub> -Gestehungskosten, Minimalwert (minimale Abgaben und Umlagen auf Strom) Benzin / Diesel 2026: 2,35 €/l / 2,63 €/l 2040: 1,88 €/l / 2,11 €/l Inkl. Deckungsbeitrag (Benzin: 0,19 €/l; Diesel 0,23 €/l)
	Energiesteuer	0,15 €/GJ (Vorschlag EC Energy Tax Directive [EU 2021/0213] für Strom, fortschrittliche Biokraftstoffe und PtX). Ab 2045: 10,75 €/GJ (gemäß Vorschlag Minimumsteuersatz für <i>fossile</i> Kraftstoffe)
Wasserstoff	Tankstellenpreis (netto)	BEniVer TÖA Kosten Produktion DE: Generische H <sub>2</sub> Gestehungskosten, Minimalwert 2030: 4,74 €/kg 2040: 3,96 €/kg 2045: 2,34€/kg Komprimierung, Transport + Deckungsbeitrag: 2040: 4,33 €/kg 2045: 2,51 €/kg
	Energiesteuer	0,15 €/GJ (Vorschlag EC Energy Tax Directive [EU 2021/0213]) Ab 2045: 10,75 €/GJ (gemäß Vorschlag [EU 2021/0213] Minimumsteuersatz für <i>fossile</i> Kraftstoffe)

### 6.4.1 Ergebnisse: Pkw

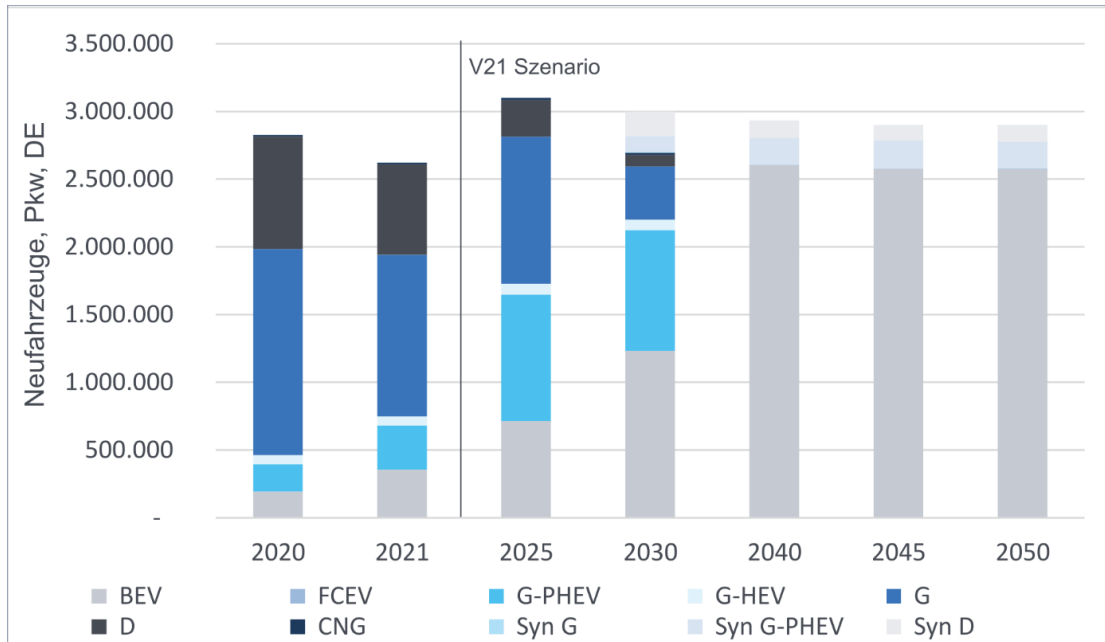
Im Folgenden werden die Ergebnisse der Modellierungen des Pkw-Markts dargestellt mit Fokus auf der Entwicklung der Neuzulassungen sowie Energiebedarfe.

Abbildung 6-3 stellt die simulierten Marktpotenziale für alternative Antriebe von Pkw-Neuzulassungen bis 2050 für das Referenzszenario dar. Dabei wird deutlich, dass aufgrund der zukünftig strikteren CO<sub>2</sub>-Flottengrenzwerte, die Neuzulassungen von elektrifizierten Fahrzeugen zukünftig deutlich ansteigen werden. Vor allem nachdem der Ausbau des Ladesäulennetzes Szenario-gemäß im Jahr 2035 abgeschlossen ist, steigt der Anteil batterieelektrischer Fahrzeuge im Vergleich zu 2030 noch einmal deutlich an. Zum Ende der 2040er Jahre zeigt sich bei sinkenden Brennstoffzellenkosten weiterhin ein kleines Marktpotenzial für Brennstoffzellenfahrzeuge im mittleren und großen Fahrzeugsegment.



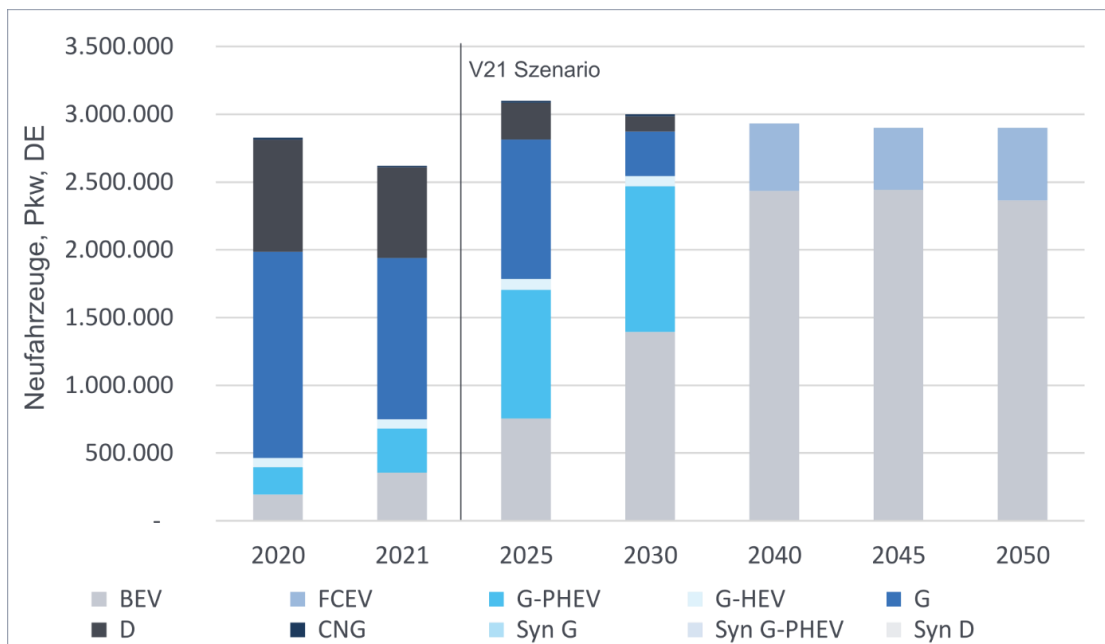
**Abbildung 6-3:** Simulierte Marktpotenziale für alternative Antriebe von Pkw-Neuzulassungen bis 2050 (2. Simulationslauf, Stand 03.2022): REF

Im Unterschied zum REF-Szenario ist der Anteil der Neuzulassungen von Pkw mit elektrifiziertem Antriebsstrang im PtX-Szenario 2030 deutlich höher, da gemäß Annahme die durchschnittlichen CO<sub>2</sub>-Emissionen der Neuzulassungen um 55 % gesenkt werden müssen (im Vergleich zu 37,5 % im REF-Szenario). Gemäß den Annahmen im PtX-Szenario können OEMs ab 2030 Fahrzeuge mit Verbrennungsmotoren als Nullemissionsfahrzeuge bei der Bilanzierung ihrer Flottengrenzwerte anrechnen lassen (bis zu 10 % der verkauften Fahrzeuge), wenn diese nachweislich über ihre Lebensdauer mit synthetischen Kraftstoffen betrieben werden (z.B. durch den Erwerb von Zertifikaten für synthetische Kraftstoffe). Nachdem im Jahr 2035 die durchschnittlichen CO<sub>2</sub>-Emissionen der Neuzulassungen gemäß Annahme um 100 % gesenkt werden müssen, werden nur noch batterieelektrische Fahrzeuge oder Fahrzeuge, die nachweislich mit synthetischen Kraftstoffen betrieben werden, zugelassen.



**Abbildung 6-4:** Simulierte Marktpotenziale für alternative Antriebe von Pkw-Neuzulassungen bis 2050 (2. Simulationslauf, Stand 03.2022): PtX

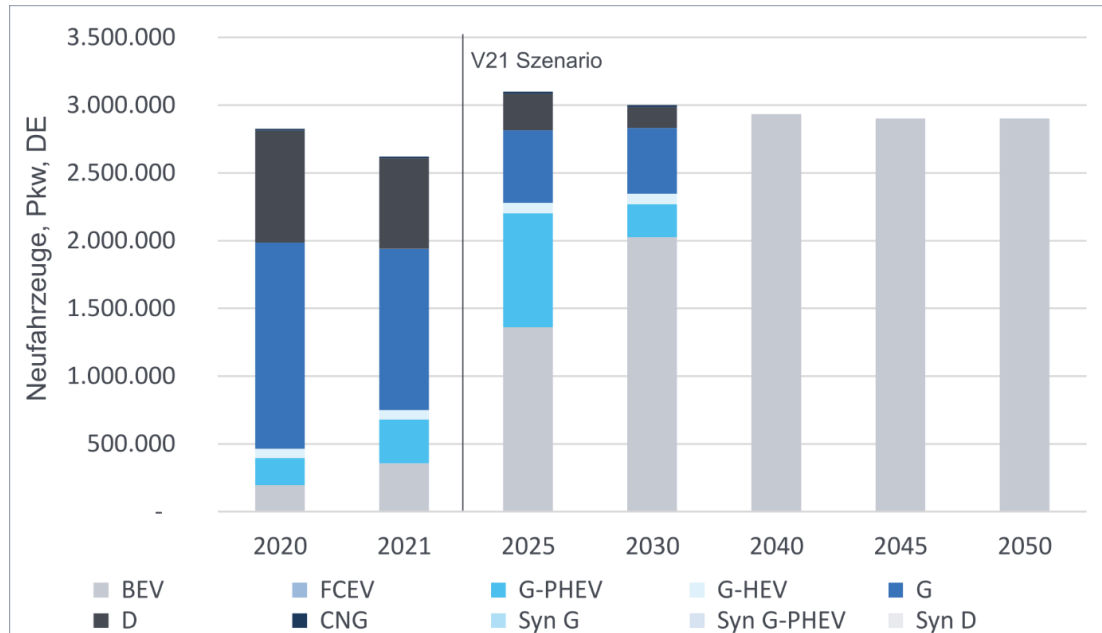
Im Gegensatz zum PtX-Szenario wird beim H2-Szenario keine Anrechenbarkeit von synthetischen Kraftstoffen bei der Neuwagenflotte angenommen. Weiterhin erfolgt im H2-Szenario eine stärkere Kostendegression von Brennstoffzellenkosten und ein rascherer Ausbau des Wasserstoff-Tankstellennetzes bis 2030. Dies resultiert in einem möglichen Marktpotenzial von Brennstoffzellenfahrzeugen ab der Mitte der 2030er Jahre. Je nachdem wie sich die Wasserstoffkosten an der Tankstelle entwickeln; im günstigsten Fall für bis zu 550.000 neue Brennstoffzellenfahrzeuge pro Jahr.



**Abbildung 6-5:** Simulierte Marktpotenziale für alternative Antriebe von Pkw-Neuzulassungen bis 2050 (2. Simulationslauf, Stand 03.2022): H2

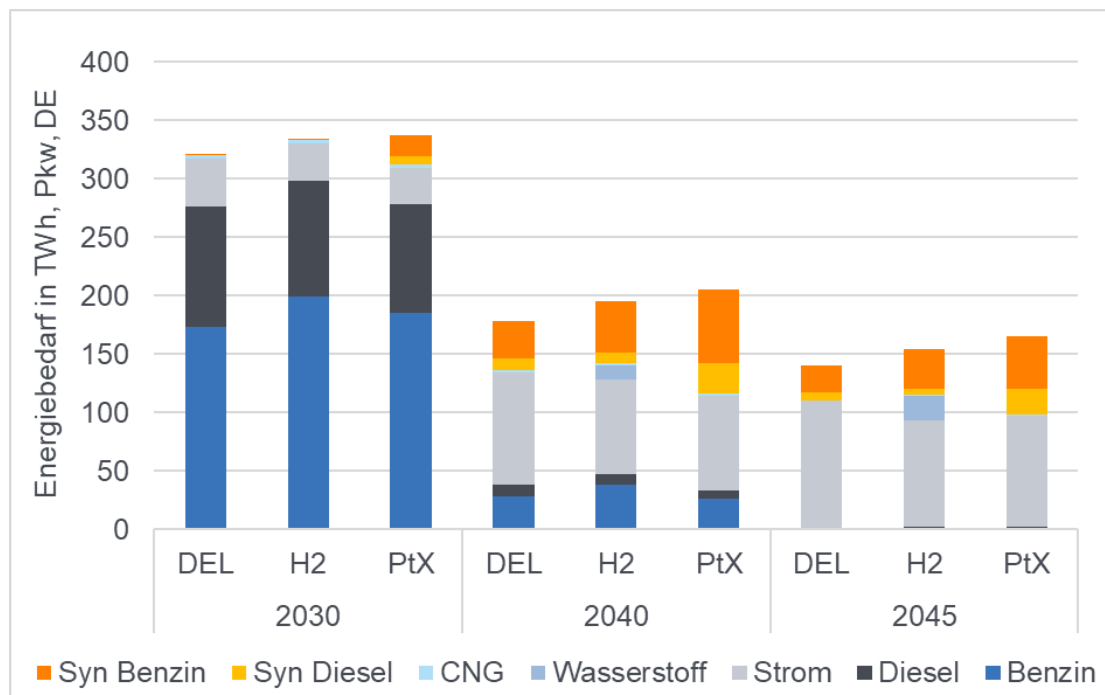


Durch den schnelleren Ausbau des Ladesäulennetzes sowie eine stärkere Preisdegression bei Batteriepacks erfolgt der Hochlauf der batterieelektrischen Fahrzeuge im DEL-Szenario schneller und stärker als in den anderen Szenarien. Selbst bei diesem ambitionierten direkt-elektrischen Szenario wird die Zielmarke der Bundesregierung, 15 Mio. batterieelektrische Fahrzeuge bis zum Jahr 2030 auf die Straße zu bringen, erst im Jahr 2032 erreicht.



**Abbildung 6-6:** Simulierte Marktpotenziale für alternative Antriebe von Pkw-Neuzulassungen bis 2050 (2. Simulationslauf, Stand 03.2022): DEL

Abbildung 6-7 stellt die Endenergiebedarfe dar, die sich in den vier beschriebenen Szenarien ergeben. Dabei liegt der Energiebedarf im REF-Szenario mit 188 TWh im Jahr 2045 am höchsten, während der des DEL-Szenarios durch den hohen Anteil an effizienteren batterieelektrischen Fahrzeugen mit 149 TWh am niedrigsten liegt.



**Abbildung 6-7:** Energiebedarfe des Pkw-Bereichs in den verschiedenen BEniVer-Szenarien bis 2045 (2. Simulationslauf, Stand 03.2022)

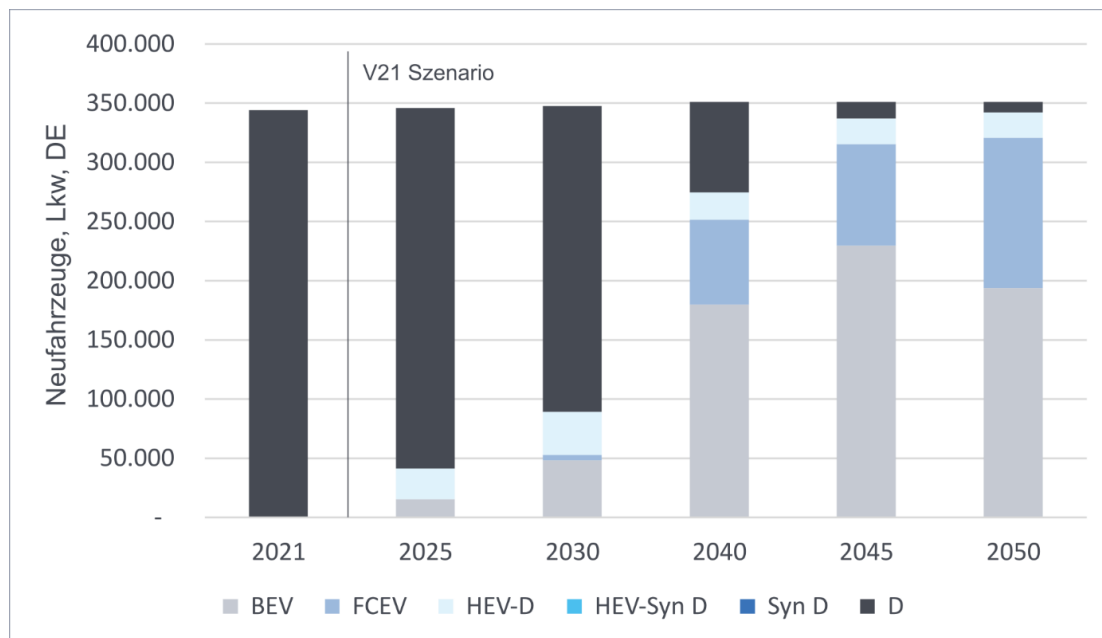
#### 6.4.2 Ergebnisse: Lkw

Im Folgenden werden die Ergebnisse der Modellierungen des Lkw-Markts dargestellt mit Fokus auf die Entwicklung der Neuzulassungen sowie Endenergiebedarfe. BEVs dominieren in den leichten und mittelschweren Lkw-Segmenten in allen Szenarien. Im H2-Szenario zeigen FCEVs auch in mittelschweren Segmenten (Verteilerverkehr) Marktpotenziale, sonst vorrangig im schweren Segment (Fernverkehr). Die Ergebnisse zeigen, dass Marktpotenziale für konventionelle Fahrzeuge, betrieben mit synthetischem Diesel, vorhanden sind, sofern Alternativen wie FCEVs noch nicht ausgereift sind (und Rahmenbedingungen, wie die Anrechenbarkeit von strombasierten Kraftstoffen, gegeben sind). Im Weiteren wird auf die einzelnen Szenario-Ergebnisse eingegangen.

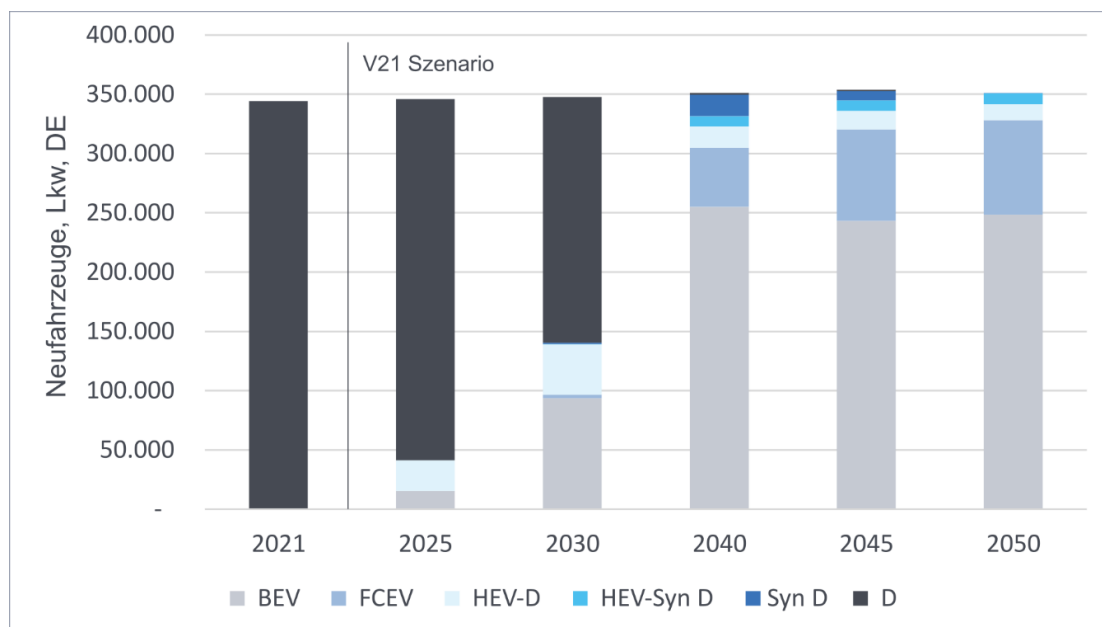
Im Referenz-Szenario (Abbildung 6-8) ist ein schneller Markthochlauf von BEVs, zunächst im leichten und später im schweren Lkw-Segment, zu beobachten (Stadtverkehr). FCEV treten ab 2027 in den Markt ein. Marktpotenziale sind insbesondere bei schweren Lkw mit hohen Tagesstreckenweiten gegeben und später auch für das mittelschwere Segment (Fernverkehr). Hybride Antriebsoptionen zeigen Marktpotenziale bei Lkw im Verteilerverkehr.

Im Vergleich zum Referenz-Szenario steigen im PtX-Szenario (Abbildung 6-9) die Marktanteile für batterieelektrische Lkw, da gemäß Annahme die durchschnittlichen CO<sub>2</sub>-Emissionen der Neuzulassungen stärker gesenkt werden müssen. Gemäß den Annahmen im PtX-Szenario, können OEMs ab 2030 Fahrzeuge mit Verbrennungsmotoren als Nullemissionsfahrzeuge bei der Bilanzierung ihrer Flottengrenzwerte anrechnen lassen, wenn diese nachweislich über ihre Lebensdauer mit strombasierten Kraftstoffen betrieben werden (z.B. durch den Erwerb von

Zertifikaten für strombasierte Kraftstoffe). Im PtX-Szenario werden daher ICEs, die nachweislich mit strombasierten Kraftstoffen betrieben werden, auch nach 2035 in geringerer Stückzahl zugelassen. Die Abnehmer strombasierter Kraftstoffe im PtX-Szenario sind, verglichen mit dem Referenz-Szenario, die potenziellen Käufer von FCEV, da sowohl die hohe Reichweitenanforderung als auch die CO<sub>2</sub>-Grenzwerte durch FCEV und ICE mit strombasierten Kraftstoffen erfüllt werden.

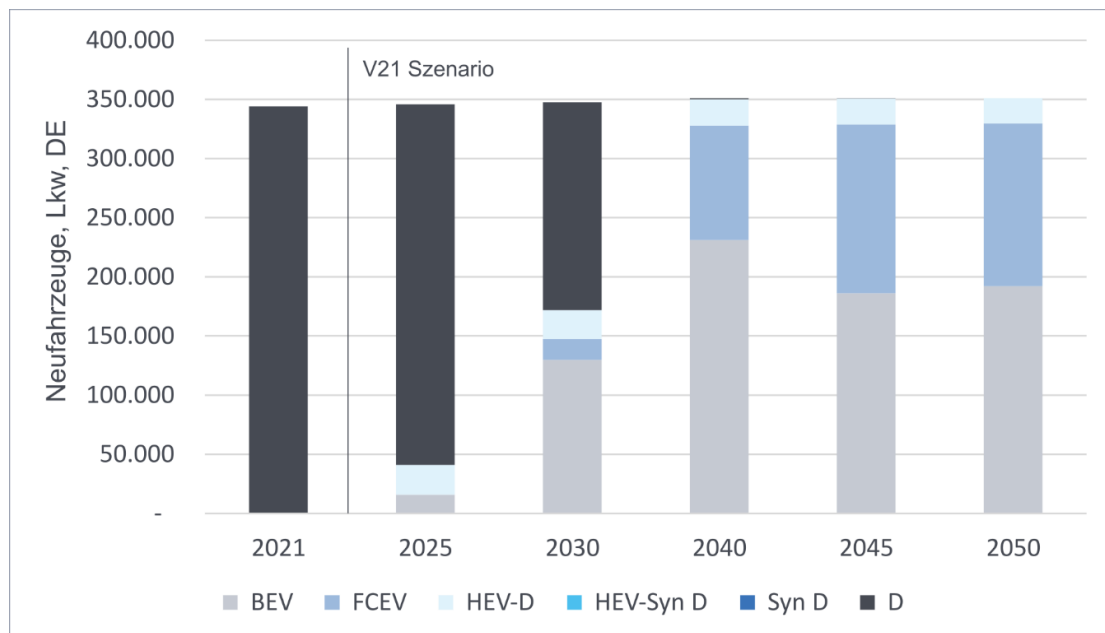


**Abbildung 6-8:** Simulierte Marktpotenziale für alternative Antriebe von Lkw-Neuzulassungen bis 2050 (2. Simulationslauf, Stand 05.2022): REF



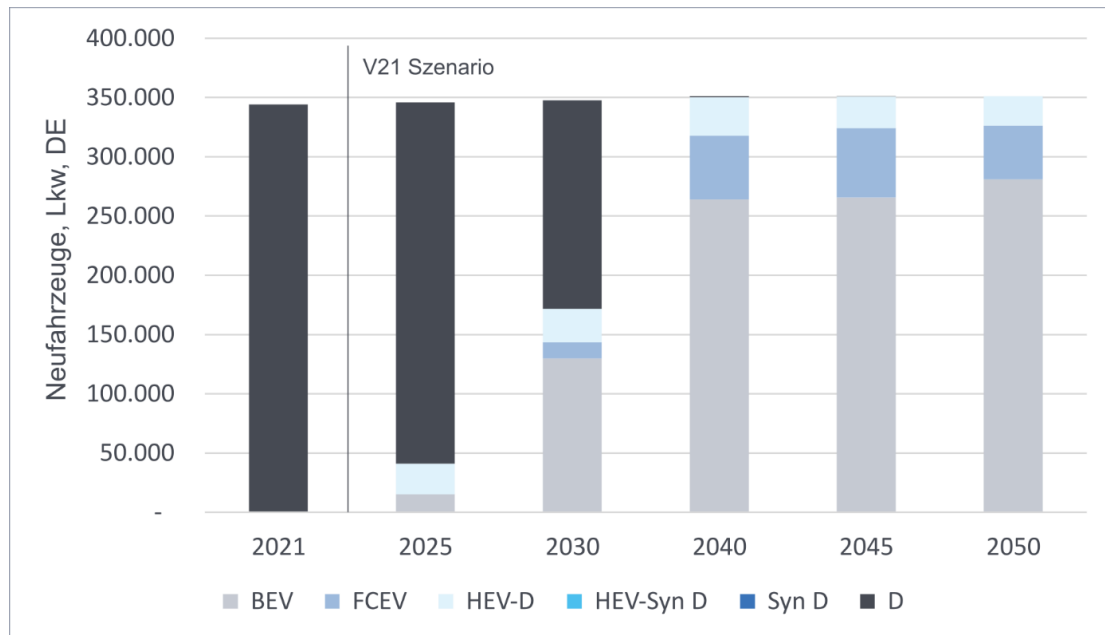
**Abbildung 6-9:** Simulierte Marktpotenziale für alternative Antriebe von Lkw-Neuzulassungen bis 2050 (2. Simulationslauf, Stand 05.2022): PtX

Im H2-Szenario (Abbildung 6-10) weiten sich die Marktpotentiale für FCEV auch in den mittelschweren und langfristig auch in den leichten Segmenten aus. Frühe Skaleneffekte im schweren Segment wirken sich auch kostenpositiv auf das leichte Segment aus.



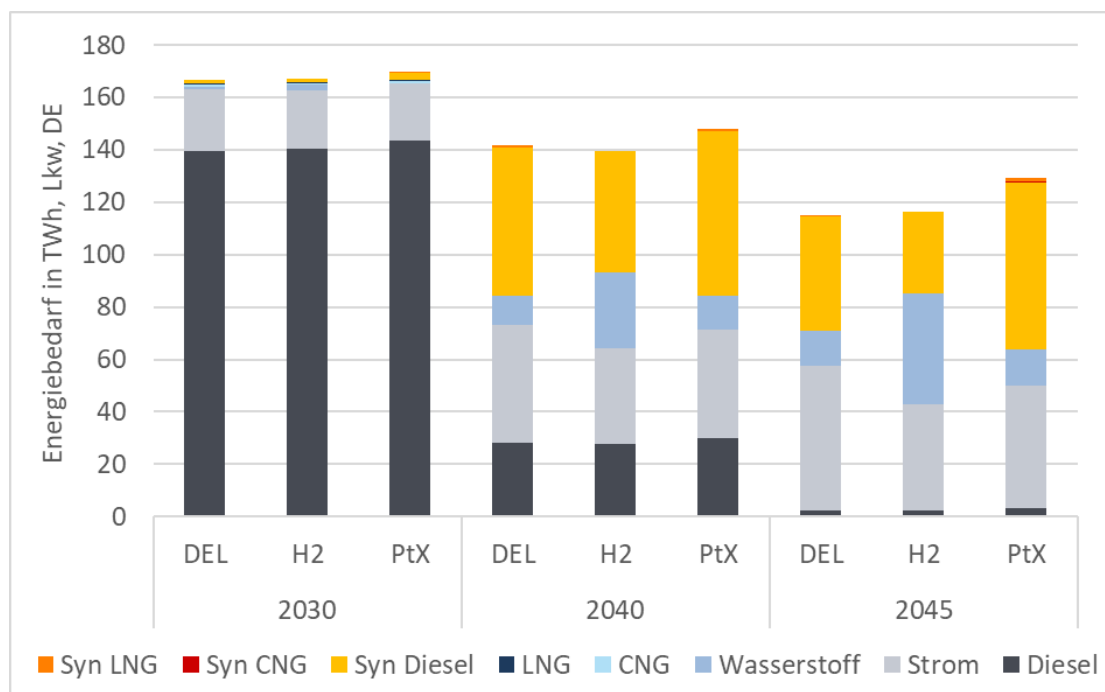
**Abbildung 6-10:** Simulierte Marktpotentiale für alternative Antriebe von Lkw-Neuzulassungen bis 2050 (2. Simulationslauf, Stand 05.2022): H2

Im DEL-Szenario (Abbildung 6-11) können im Vergleich zum Referenz-Szenario höhere Marktpotentiale für BEVs erreicht werden. BEVs dominieren in allen Lkw-Segmenten. HEV und FCEV sind folglich nur noch für schwer zu elektrifizierende Einsätze notwendig (z.B. aufgrund Reichweitenanforderungen).



**Abbildung 6-11:** Simulierte Marktpotenziale für alternative Antriebe von Lkw-Neuzulassungen bis 2050 (2. Simulationslauf, Stand 05.2022): DEL

Abbildung 6-12 beschreibt die Endenergiebedarfe für den Straßengüterverkehr, wie sie sich in den vier beschriebenen Szenarien ergeben. Dabei sinkt der Energiebedarf im REF-Szenario um 29 % zwischen 2020 und 2050, während sich der des DEL-Szenarios, durch den hohen Anteil an effizienteren batterieelektrischen Fahrzeugen, um 36 % reduziert.



**Abbildung 6-12:** Energiebedarfe des Lkw-Bereichs in den verschiedenen BEniVer-Szenarien bis 2045 (2. Simulationslauf, Stand 03.2022)

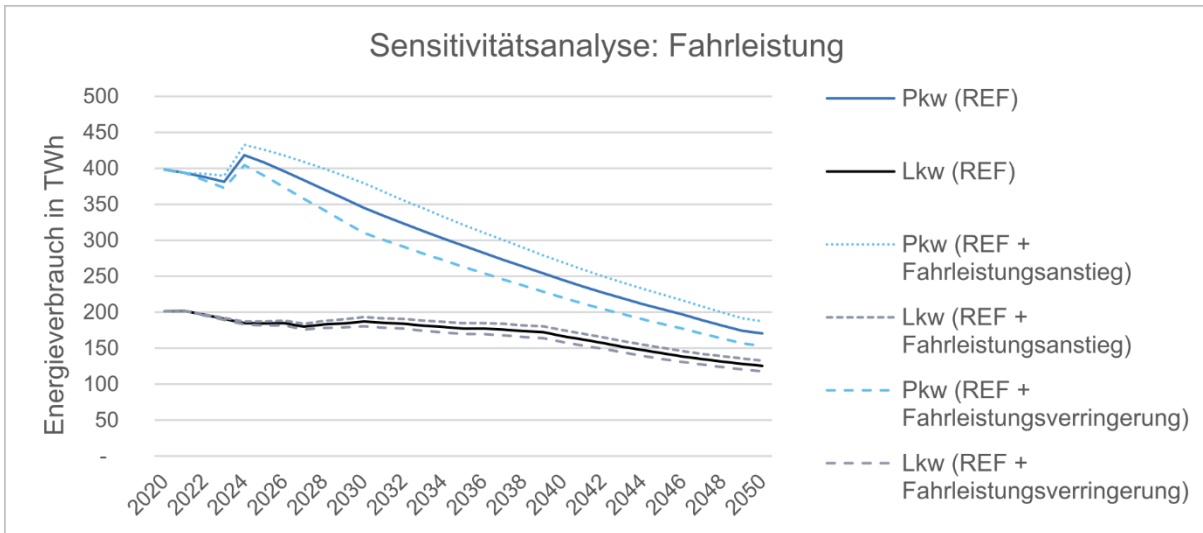
### **6.4.3 Sensitivitätsanalyse**

#### **Fahrleistungsvariation im REF-Szenario (Pkw und Lkw)**

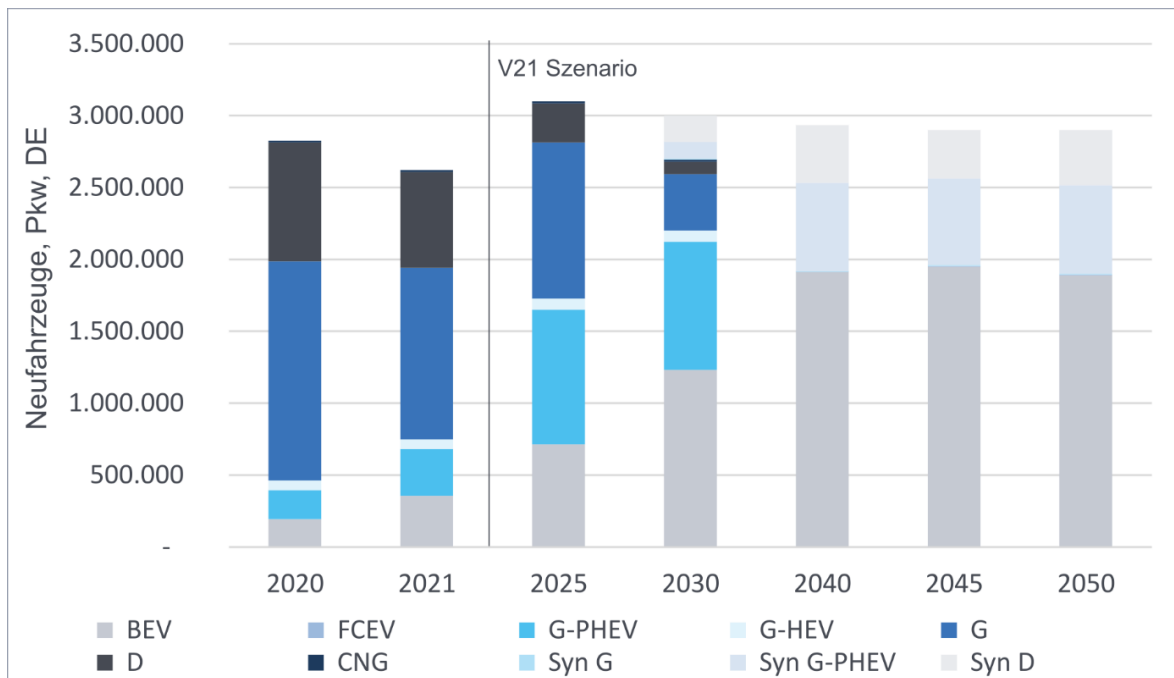
Abbildung 6-13 zeigt die Variation der durchschnittlichen Jahresfahrleistung für Pkw und Lkw im Referenz-Szenario und dessen Auswirkungen auf den Energieverbrauch der Pkw- und Lkw-Flotte. Eine Erhöhung der Jahresfahrleistung würde den Energieverbrauch des Pkw-Bestands im Jahr 2050 um 17 TWh, den des Lkw-Bestandes um 7,5 PJ erhöhen. Dies entspricht etwa 0,8 Mio. t zusätzlich benötigter, synthetischer Kraftstoffe. Im Jahr 2045 läge der Energiebedarf, durch die in diesem Fall noch nicht weit genug fortgeschrittene Elektrifizierung der Fahrzeugflotte, in Summe sogar bei mehr als 30 TWh über dem des Referenz-Szenarios, was knapp 1,4 Mio. t zusätzlich benötigter, synthetischer Kraftstoffe entspricht. Im Falle der Verringerung der Fahrleistung verhält sich der Energie- und Kraftstoffverbrauch entsprechend reziprok.

#### **Unbegrenzte Anrechenbarkeit von strombasierten Kraftstoffen im PtX-Szenario (nur Pkw)**

Gemäß den Annahmen aus Tabelle 6-1 liegt die Anrechenbarkeit von strombasierten Kraftstoffen auf die Neuwagenflotte, angelehnt an das Zertifikatsystem entwickelt von Frontier Economics [Bothe et al. 2020; Gatzert et al. 2020], bei bis zu 10 %. Um das maximale Potenzial der synthetischen Kraftstoffe auf dem deutschen Pkw-Markt abschätzen zu können, wurde eine Sensitivitätsanalyse ohne Begrenzung der verfügbaren Zertifikate zur Anrechnung von Verbrenner-Fahrzeugen als Nullemissionsfahrzeuge durchgeführt. Abbildung 6-14 zeigt, dass durch diese Annahme deutlich gesteigerte Marktpotenzial für synthetische Kraftstoffe. Während dieses im PtX-Szenario ab 2040 noch bei knapp 300.000 Neufahrzeugen pro Jahr liegt, die mit synthetischen Kraftstoffen angetrieben werden können, liegt das Marktpotenzial im Sensitivitätstest ohne Begrenzung der Anrechenbarkeit mehr als dreimal so hoch, bei etwa einer Million Fahrzeuge jährlich. Allerdings geht dieser Anstieg mit einer deutlichen Steigerung des jährlichen Bedarfs an synthetischen Kraftstoffen im Jahr 2050 um 119 % einher (von 47 TWh auf 99 TWh im PtX-Szenario ohne Begrenzung, bzw. von fast 4 Mio. Tonnen auf über 8,3 Mio. Tonnen Jahresbedarf an synthetischen Kraftstoffen).



**Abbildung 6-13:** Sensitivität des Energiebedarfes der Pkw- und Lkw-Flotte bei +10 % Fahrleistungsanstieg sowie -10 % Fahrleistungsverringderung



**Abbildung 6-14:** Simulierte Marktpotenziale für alternative Antriebe von Pkw-Neuzulassungen bis 2050 ohne Begrenzung der verfügbaren Zertifikate (Sensitivitätstest, Stand 09.2022): PtX

## 6.5 Landwirtschaft und Sonderfahrzeuge

Neben dem Pkw- und Lkw-Bereich, bestehen im Bereich der Landwirtschaft sowie der Sonderfahrzeuge ebenfalls Potenziale für synthetische Kraftstoffe. Im folgenden Abschnitt wird der aktuelle und zukünftige Kraftstoffbedarf von Sonderfahrzeugen für verschiedene Nischenanwendungen wie Bundeswehr, Rettungsfahrzeuge, Baumaschinen und Bergbaufahrzeuge abgeschätzt. Ebenfalls werden weitere Verkehrsbereiche, die innerhalb der VECTOR21-Simulationen nicht berücksichtigt werden, mit einbezogen, insbesondere Landwirtschaft, Linien- und Fernreisebusse sowie der Schienenverkehr.

Für einen Teil der betrachteten Verkehrsbereiche existieren bereits belastbare Statistiken. Dazu zählt der Kraftstoffbedarf der Landwirtschaft, Busse, Baumaschinen sowie des Schienenverkehrs. Für die Bundeswehr konnte der Kraftstoffbedarf für alle mobilen Systeme auf Basis der jährlichen CO<sub>2</sub>-Emissionen abgeleitet werden. Tabelle 6-5 zeigt die Referenzen in Bezug auf den Kraftstoffverbrauch in den genannten Verkehrsbereichen sowie die Herangehensweise und Annahmen zur Ermittlung des Kraftstoffbedarfs für weitere Nischenanwendungen, wie Rettungsfahrzeuge und Polizei. Gerade bei letztgenannten, nicht umfassend dokumentierten Verkehrsbereichen ist zu beachten, dass starke Vereinfachungen gemacht werden müssen. Darum handelt es sich lediglich um eine überschlägige Schätzung des Kraftstoffbedarfs.

**Tabelle 6-5:** Referenzen und Annahmen zur überschlägigen Berechnung des Kraftstoffbedarfes von Landwirtschaft und Sonderfahrzeugen für Nischenanwendungen

Bereich	Abschätzung Jahresverbrauch	Referenzen und Annahmen
Kranken- und Rettungswagen	285 Mio. L Diesel	Eigene Berechnung auf Basis des Verbrauches eines städtischen Rettungswagens (ca. 17,5 L/100km, Laufleistung ca. 200 km/Tag) <sup>18</sup> und Hochrechnung auf den Bestand der KTWs und Notarzt-Einsatzfahrzeuge in Deutschland (22.312 Fahrzeuge) [KBA 2022a].
Bundeswehr	253 Mio. L Kraftstoff	Eigene Berechnung auf Basis des CO <sub>2</sub> -Ausstoßes. CO <sub>2</sub> -Gesamtemissionen aller mobilen Systeme der Bundeswehr im Jahr 2018: 0,67 Mio. t CO <sub>2</sub> -Äq/Jahr [BT 19/16169]. Annahme: CO <sub>2</sub> -Faktor Dieseldieselkraftstoff (2,65 kgCO <sub>2</sub> /Liter Diesel) [BAFA 2021].
Feuerwehr	15 Mio. L Diesel	Hochrechnung auf Basis des Verbrauches der Feuerwehr München (Berufsfeuerwehr: 394.896 L Diesel im Jahr 2020) [Berufsfeuerwehr München 2020], Augsburg (Berufsfeuerwehr: 61.042 L Diesel durchschnittlich über die Jahre 2015-2018) [Amt für Brand- und Katastrophenschutz 2018] und Germering (Freiwillige Feuerwehr: 2.429 L Diesel durchschnittlich in den Jahren 2004 und 2011) [FFGermering 2004/2011] in Abhängigkeit von der Einwohnerzahl der jeweiligen Stadt und hochgerechnet auf die Einwohnerzahl Deutschlands.

<sup>18</sup> Johanniter-Unfall-Hilfe - Rettungswache Stuttgart (Städtisches Einzugsgebiet, 2 x 12h Schicht)



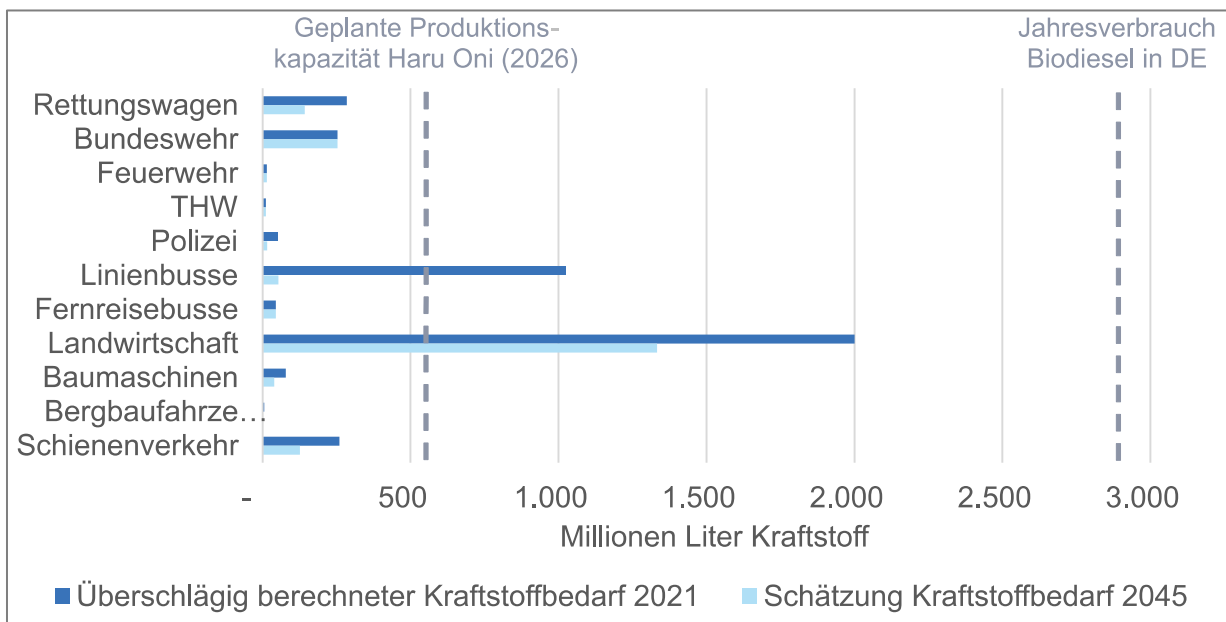
Bereich	Abschätzung Jahresverbrauch	Referenzen und Annahmen
THW	11 Mio. L Kraftstoff	Hochrechnung auf Basis des mittleren Verbrauchs des Ortsverbands Celle in den Jahren 2009-2011 (5.251 L Diesel, 884 L Benzin) [THW 2009] und des Ausbildungszentrums Neuhausen in den Jahren 2018 und 2019 (22.134 L Diesel, 3.578 L Benzin) [THW 2021] in Abhängigkeit der 668 THW-Ortsverbände [THW 2022].
Polizei	50 Mio. L Kraftstoff	Hochrechnung auf Basis des mittleren Verbrauches der Polizei Berlin im Jahr 2017 (1,9 Mio. L Diesel) [Heine 2017] und des Kraftstoffverbrauches der Polizei Baden-Württembergs im Jahr 2014 (7,5 Mio. L Kraftstoff ohne Boote und Hubschrauber) [LT 15/6425] in Abhängigkeit von der entsprechenden Einwohnerzahl und hochgerechnet auf die Einwohnerzahl Deutschlands.
Linienbusse	1.025 Mio. L Diesel	Basierend auf der DESTATIS Veröffentlichung zum mittleren Energieverbrauch im Straßenverkehr nach Kraftfahrzeugtypen (Busse: 38,35 PJ als Mittelwert der Jahre 2007, 2012, 2016 und 2017 → 1.070 Mio. L Diesel pro Jahr) [Destatis 2019] und abzüglich des abgeschätzten Kraftstoffverbrauches der Fernreisebusse (45 Mio. L Diesel).
Fernreisebusse	45 Mio. L Diesel	Hochrechnung auf Basis der Anzahl an Flixbus-Modellen im Jahr 2017 (664 Fahrzeuge) [ifeu 2017], einer angenommenen mittleren Jahresfahrleistung je Fernbus von 194.300 km [BAST 2017] sowie eines mittleren Verbrauches von 0,35 L Diesel/km [Bruns et al. 2018].
Landwirtschaft	2.000 Mio. L Diesel	Basierend auf Daten der Generalzolldirektion: (Steuerbegünstigter) Kraftstoffverbrauch in der Land- und Forstwirtschaft: 2.000 Mio. L Diesel [Remmele 2022].
Baumaschinen	78 Mio. L Diesel	Basierend auf der DESTATIS Veröffentlichung zum mittleren Energieverbrauch im Straßenverkehr nach Kraftfahrzeugtypen (nur sonstige Fahrzeuge also „Zugmaschinen, Baustellen-, Polizei- und ähnliche Fahrzeuge“ der Haltergruppe „Baugewerbe“ berücksichtigt: 2,8 PJ im Jahr 2017).
Bergbaufahrzeuge	6 Mio. L Diesel	Basierend auf der DESTATIS Veröffentlichung zum mittleren Energieverbrauch im Straßenverkehr nach Kraftfahrzeugtypen (nur sonstige Fahrzeuge also „Zugmaschinen, Baustellen-, Polizei- und ähnliche Fahrzeuge“ der Haltergruppe „Bergbau, Gewinnung von Steinen und Erden“ berücksichtigt: 0,2 PJ im Jahr 2017).
Schieneverkehr	260 Mio. L Diesel	Basierend auf der BMDV Veröffentlichung „Verkehr in Zahlen“. Durchschnittlicher Dieserverbrauch des Schienenverkehrs von 2016-2020: 260 Mio. L Diesel [BMDV 2022].

Die Ergebnisse der überschlägig berechneten Kraftstoffverbräuche für verschiedene Sonderfahrzeuge und Nischenanwendungen sind in Abbildung 6-15 dargestellt. In Summe werden für die Landwirtschaft und Sonderanwendungen aktuell etwa 4 Milliarden Liter Kraftstoff jährlich benötigt. Beim Großteil dieser Kraftstoffe handelt es sich um Dieseldieselkraftstoffe. Umgerechnet würden also etwa 3,4 Mio. Tonnen Dieseldieselkraftstoff benötigt. Dies entspricht in etwa 6 % des jährlichen Kraftstoffverbrauches des Verkehrs in Deutschland (69.425 Mio. L Kraftstoff im Jahr 2019) [UBA 2022e]. Dabei ist zu beachten, dass etwa die Hälfte des ermittelten Bedarfs in der

Landwirtschaft anfällt und daher diesem Sektor und nicht dem Verkehrssektor zugeschrieben wird.

Zum Vergleich der Größenordnung ist in Abbildung 6-15 weiterhin die im Jahr 2026 geplante jährliche Produktionskapazität von 550 Mio. Litern Benzin der Anlage „Haru Oni“ von Siemens Energy und der Dr. Ing. h.c. F. Porsche AG in Chile [Siemens Energy] dargestellt. Eine Kapazität, die theoretisch bereits ausreichen würde, um einen Teil der Sonderfahrzeuge mit Kraftstoff zu versorgen, welche aktuell allerdings hauptsächlich mit Diesel betrieben werden. Verglichen mit dem jährlichen Kraftstoffverbrauch von Biodiesel in Deutschland, ließe sich bereits heute der gesamte Kraftstoffbedarf der Landwirtschaft, Rettungsfahrzeuge, Baumaschinen, Bergbau- und Schienenfahrzeuge über den Biodiesel-Anteil Deutschlands abdecken.

Ferner kann davon ausgegangen werden, dass zukünftig auch im Bereich der Landwirtschaft und Sonderfahrzeuge für Nischenanwendungen ein Teil der Fahrzeugflotte elektrifiziert wird. In Abbildung 6-15 ist daher ebenfalls eine Schätzung des zukünftigen Kraftstoffbedarfs der entsprechenden Verkehrsbereiche dargestellt. Die dabei getroffenen Annahmen werden im folgenden Abschnitt erläutert.



**Abbildung 6-15:** Überschlägig berechneter Kraftstoffbedarf von Sonderfahrzeugen und Nischenanwendungen in Deutschland

Linienbusse können durch die hohe Planbarkeit und das bereits ausreichende Angebot an reichweitenstarken Fahrzeugen voraussichtlich großteils elektrifiziert werden. Nimmt man für das Jahr 2045 eine Elektrifizierung von 95% der Linienbusse an<sup>19</sup>, so würde der Kraftstoffbedarf in diesem Verkehrsbereich ebenfalls um etwa 95 % sinken.

<sup>19</sup> Vgl. der Anteil an emissionsfreien Stadtbussen an den Neuzulassungen von Norwegen und den Niederlanden, dieser liegt bereits jetzt über 96% [Transport & Environment 2022].

Es wird angenommen, dass in der Landwirtschaft etwa ein Drittel der Fahrzeuge, vor allem kleine und mittelgroße, elektrifiziert werden könnten [Frerichs 2022]. Dabei wird vereinfachend davon ausgegangen, dass der Elektrifizierungsgrad unabhängig von der Größe, dem Kraftstoffverbrauch und der Fahrleistung des jeweiligen Fahrzeugs zur Reduktion des Kraftstoffbedarfs beiträgt. Bei Fahrzeugen mit hohen Leistungs- und Verfügbarkeitsanforderungen ist der Bedarf an synthetischen Energieträgern mit hoher Energiedichte dagegen zukünftig weiterhin gegeben. Wie groß hier der zukünftige Anteil an wasserstoffbetriebenen Fahrzeugen ist, lässt sich jedoch kaum abschätzen. Aus diesem Grund wird konservativ angenommen, dass der nicht elektrifizierbare Bedarf weiterhin über synthetische Energieträger gedeckt werden muss.

Der Einsatz- und Streifendienst der Polizei lässt sich, basierend auf den Aussagen des Leitfadens zur Elektromobilität in behördlichen Flotten, zu 70 bis 90 % mit batterieelektrischen Fahrzeugen mit Schnellladefähigkeit und DC-Ladesäulen<sup>20</sup> realisieren [Suckow 2021]. Der Ermittlungsdienst sogar zu 100 %. Für die Abschätzung des Kraftstoffbedarfs für 2045 wird konservativ mit einem Elektrifizierungsgrad der polizeilichen Flotte von 70 % gerechnet.

Bereits heute sind vollelektrische Krankenwagen verfügbar und in verschiedenen Dienststellen im Einsatz. Für die planbaren Fahrten eines Krankenwagens, wird angenommen, dass diese weitgehend mit elektrifizierten Fahrzeugen durchgeführt werden können. Es existieren ebenfalls bereits elektrifizierte Rettungswagen, aber hier könnte durch die hohen Anforderungen an die Verfügbarkeit dieser Fahrzeuge weiterhin ein Bedarf an chemischen Energieträgern bestehen. Aufgrund der schlechten Datenlage zum segmentierten Bestand von Kranken- und Rettungswagen wird davon ausgegangen, dass etwa die Hälfte der Fahrzeuge elektrifiziert werden kann. Es wird vereinfachend davon ausgegangen, dass der Elektrifizierungsgrad unabhängig von der Größe, dem Kraftstoffverbrauch und der Fahrleistung des jeweiligen Fahrzeuges zur Reduktion des Kraftstoffbedarfs beiträgt.

Das Pilotprojekt des Fernbusanbieters FlixBus zum Einsatz von batterieelektrischen Bussen in Deutschland, wurde aufgrund der zu geringen Reichweite der Fahrzeuge und der langen Ladezeiten zunächst ausgesetzt. Laut dem Gründer des hinter FlixBus stehenden Münchner Unternehmens FlixBus sei der Einsatz von Elektrobussen erst ab Reichweiten von etwa 400 Kilometern und einer Ladezeit von unter einer Stunde denkbar [Schwämmlein 2020]. Aktuell konzentriert sich FlixBus daher auf die Entwicklung von Brennstoffzellenfahrzeugen. Es wird also weiterhin einen Bedarf nach chemischen Energieträgern mit hoher Energiedichte für den Fernbusverkehr geben. Wie groß der Anteil an Wasserstoff im Vergleich zu Diesel sein wird, lässt sich aktuell nicht verlässlich abschätzen. Daher wird für diesen Verkehrsbereich die konservative Annahme getroffen, dass für 2045 der gleiche Kraftstoffbedarf besteht wie für 2021.

Bei Baumaschinen lassen sich vor allem kleinere Maschinen mit geringer Leistungsanforderung batterieelektrisch realisieren. So haben bereits mehrere Hersteller kommerzielle Produkte auf den Markt gebracht. Allerdings sind Bagger über 10 Tonnen für etwa 46 % der gesamten CO<sub>2</sub>-Emissionen von Baufahrzeugen verantwortlich [Wyatt 2022]. Entsprechend wird für den

---

<sup>20</sup> Da die Umwandlung von Wechselstrom (englisch alternating current, AC) zu Gleichstrom (englisch direct current, DC) direkt in der Ladestation stattfindet, erfolgt der Ladevorgang an einer DC-Ladesäule (Ladeleistungen von bis zu 350 kW möglich) deutlich schneller als an AC-Ladesäulen (Ladeleistungen von bis zu 22 kW üblich)

Verkehrsbereich der Baumaschinen vereinfachend ein Elektrifizierungsgrad von 50 % angenommen.

Die Elektrifizierung von Bergbaumaschinen verspricht Kostenersparnisse durch einen reduzierten Bedarf an der Belüftung der Schächte sowie eine verringerte Hitzebelastung bei der geringeren Abwärme von elektrischen Bergbaumaschinen. In der kanadischen Provinz Ontario entsteht bereits die weltweit erste Mine, die ausschließlich elektrische Bergbaumaschinen einsetzen wird [Epiroc 2022]. Sandvik, ein führender Hersteller, geht sogar davon aus, dass elektrifizierte Bergbaumaschinen in zehn Jahren deren Hauptgeschäft werden könnte [Sandvik 2021]. Daher wird für diesen Verkehrsbereich ein Elektrifizierungsgrad von 75 % angenommen.

Im Schienenbereich wird angenommen, dass zukünftig alle Triebzüge des Schienenpersonennahverkehrs und etwa 50 % der Rangierloks elektrifiziert werden können. Wie groß der Anteil an Wasserstoff, im Vergleich zu Diesel, als Energieträger sein wird, lässt sich nicht verlässlich abschätzen. Weiterhin kann sich die Dekarbonisierung dieses Verkehrsbereichs in Deutschland aufgrund der langen Lebensdauer von Lokomotiven verzögern [Pagenkopf et al. 2022].

Der zukünftige Bedarf an Kraftstoffen für die Bundeswehr, Feuerwehr und das Technische Hilfswerk (THW) lässt sich nur schwer einschätzen. Für diese Verkehrsbereiche wird die konservative Annahme getroffen, dass für 2045 der gleiche Kraftstoffbedarf besteht wie für 2021.

Der Kraftstoffbedarf für die Landwirtschaft und Sonderfahrzeuge könnte sich von aktuell etwa 3,4 Millionen Tonnen Kraftstoff auf 1,7 Millionen Tonnen Kraftstoff bis zum Jahr 2045 halbieren. Aktuell hält der Erdölbevorratungsverband für die Bundesrepublik Deutschland etwa 15 Millionen Tonnen Rohöl und 9,5 Millionen Tonnen fertige Mineralölerzeugnisse zurück [Bundesregierung 2022a]. Die Menge an Mineralölerzeugnissen entspricht fast dem dreifachen der Menge, die derzeit in Deutschland von der Landwirtschaft und Sonderfahrzeugen für Nischenanwendungen benötigt wird sowie dem fünffachen der Menge, die für 2045 abgeschätzt wird.

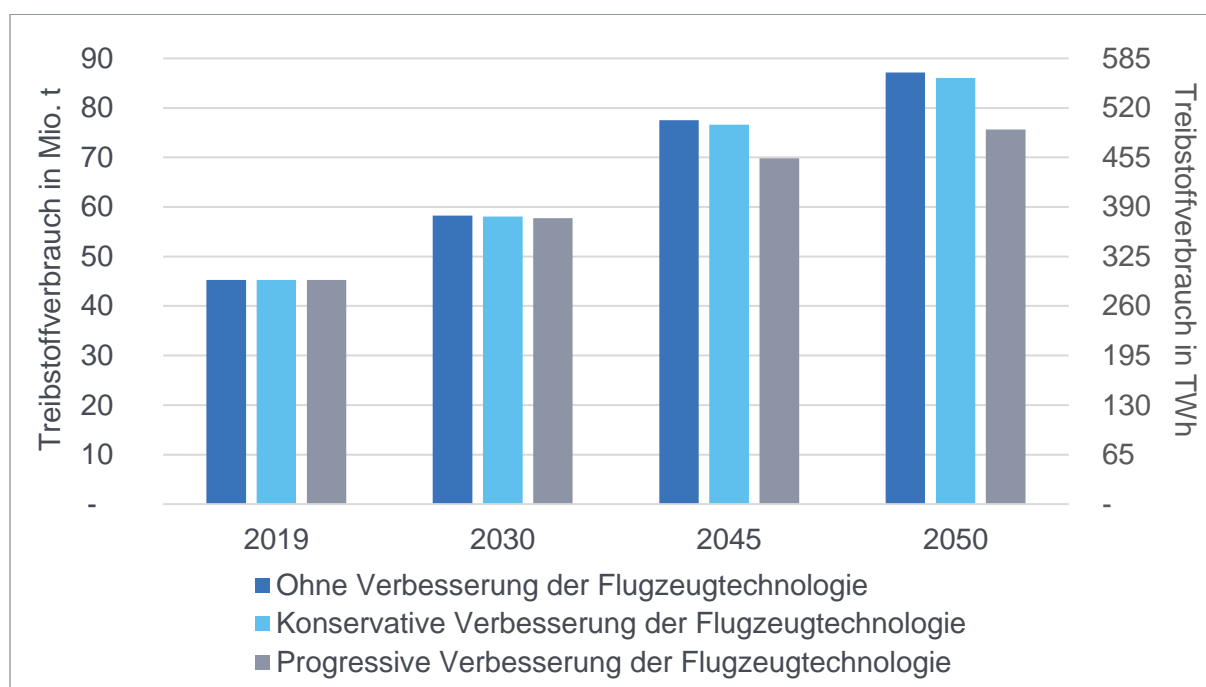
## 6.6 Luftfahrt

Für die Abschätzung der Kraftstoffnachfrage im Luftverkehr innerhalb Europas wurde ein mehrstufiges Modellierungsverfahren angewendet. Ausgangspunkt der Modellierung ist die Verkehrsprognose des DLR-Instituts für Flughafenwesen und Luftverkehr. In einem zweiten Schritt wird im Luftverkehrs-Modellsystem modelliert, mit welchen Flugzeugtypen das Verkehrsaufkommen abgewickelt wird. In einem letzten Schritt wird auf Basis von Flugleistungsmodellen für jede einzelne Route für die jeweils eingesetzten Flugzeugtypen der Treibstoffverbrauch modelliert. Somit lassen sich die Daten in unterschiedlichen geografischen Auflösungen (z.B. Flughafen, Land, EU) aggregieren.

Da unterschiedliche technologische Entwicklungen zu erwarten sind, wurden insgesamt drei Technologie-Szenarien modelliert: Für das erste Szenario wurde ein Business-as-usual-Ansatz angenommen, der keine technologischen Verbesserungen über den aktuellen Technologiestand hinaus annimmt, d.h. Verbesserungen in der Treibstoffeffizienz kommen ausschließ-

lich durch den Ersatz von älteren Flugzeugen durch Flugzeuge des aktuellen Technologiestands zustande. Weiterhin wurde ein konservatives Szenario abgeschätzt, bei dem neue Flugzeugtypen in Dienst gestellt werden, die jedoch nur geringe Verbesserungen gegenüber heutigen Flugzeugen aufweisen. Zuletzt wurde noch ein progressives Szenario modelliert, bei dem neue Flugzeugtypen eingepflegt werden, die eine hohe Effizienzsteigerung aufweisen.

Da die COVID-19-Pandemie während der BEniVer-Projektlaufzeit aufgetreten ist und bisher nie dagewesene Einbrüche der Luftverkehrsnachfrage nach sich gezogen hat, wurden die Szenarien entsprechend der aktuellen Entwicklung angepasst. Nach Review einschlägiger Luftverkehrsprognosen und -szenarien wurde als Arbeitshypothese eine Rechtsverschiebung der langfristigen Verkehrsprognose um fünf Jahre angenommen. Aufgrund von Änderungen in der Flotte (u.a. Ausphasung besonders ineffizienter Flugzeugtypen, beschleunigte Indienststellung besonders treibstoffeffizienter Flugzeuge) wird jedoch gegenüber der Ausgangsprognose ohne die Effekte der Pandemie ein deutlicher Rückgang der Gesamtentwicklung des benötigten Treibstoffs für den Luftverkehr angenommen.



**Abbildung 6-16:** Treibstoffverbrauchsszenario des Luftverkehrs in Europa (EU27) 2019-2050

Werden nun die von der Europäischen Kommission im Rahmen des Fit-for-55-Pakets vorgeschlagenen Beimischungsquoten für den Luftverkehr unterstellt, ergibt sich für den Luftverkehr ein Bedarf an nachhaltigen Treibstoffen auf Basis der obigen Prognose (geografisch eingeschränkt auf die EU-27-Mitgliedsstaaten) von 20,3 bis 29,5 Mio. t im Jahr 2045, wovon aufgrund der Unterquote für strombasierte Kraftstoffe zwischen 5,9 und 8,5 Mio. t auf diese Treibstoffe entfallen würden und 14,4 bis 20,2 Mio. t auf nachhaltige Treibstoffe anderer Produktionsverfahren bzw. basierend auf anderen Ausgangsrohstoffen.

## 6.7 Zukünftiger Endenergie- und Kraftstoffbedarf in Deutschland

Auf Basis der in Kapitel 6.4 bis 6.6 beschriebenen Szenarien für den Straßenverkehr und die Luftfahrt wurden die Gesamtenergiebedarfe für den Transportsektor zusammengestellt. In Abbildung 6-17 bis Abbildung 6-19 ist der resultierende Energiebedarf des Transportsektors in Deutschland, getrennt nach Energieträgern, dargestellt. Das DEL-Szenario hat den höchsten Strombedarf, der bis 2050 auf 182 TWh ansteigt, im H2-Szenario sind es nur 147 TWh und im PtX-Szenario 161 TWh. Andersherum sieht es für den Bedarf an synthetischen Kraftstoffen aus, hier ist der Bedarf im H2-Szenario mit 141 TWh am geringsten, im Szenario DEL mit 154 TWh etwas höher und mit 190 TWh im Szenario PtX am höchsten. Der Bedarf an Gasen (Methan, Wasserstoff) ist im H2-Szenario mit 78 TWh am höchsten und in den Szenarien PtX mit 21 TWh und DEL mit 15 TWh deutlich geringer.

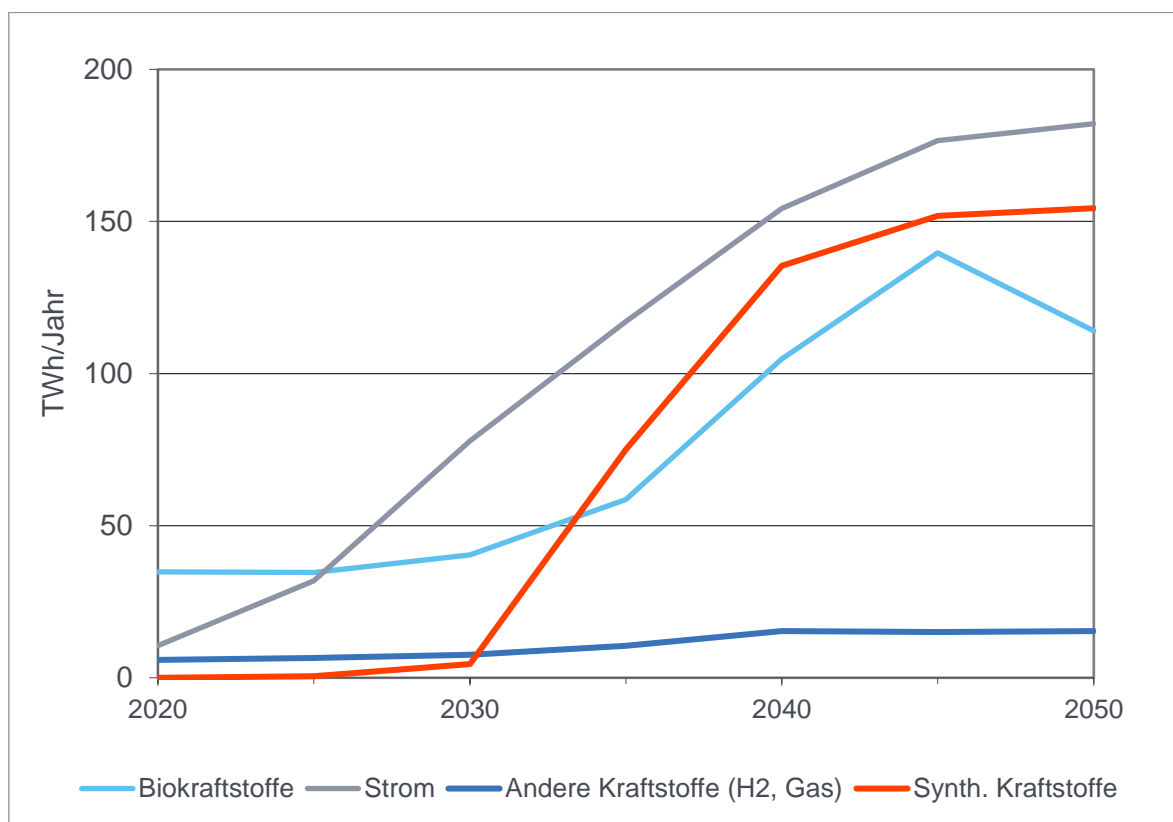


Abbildung 6-17: Energiebedarf des Transportsektors im DEL-Szenario

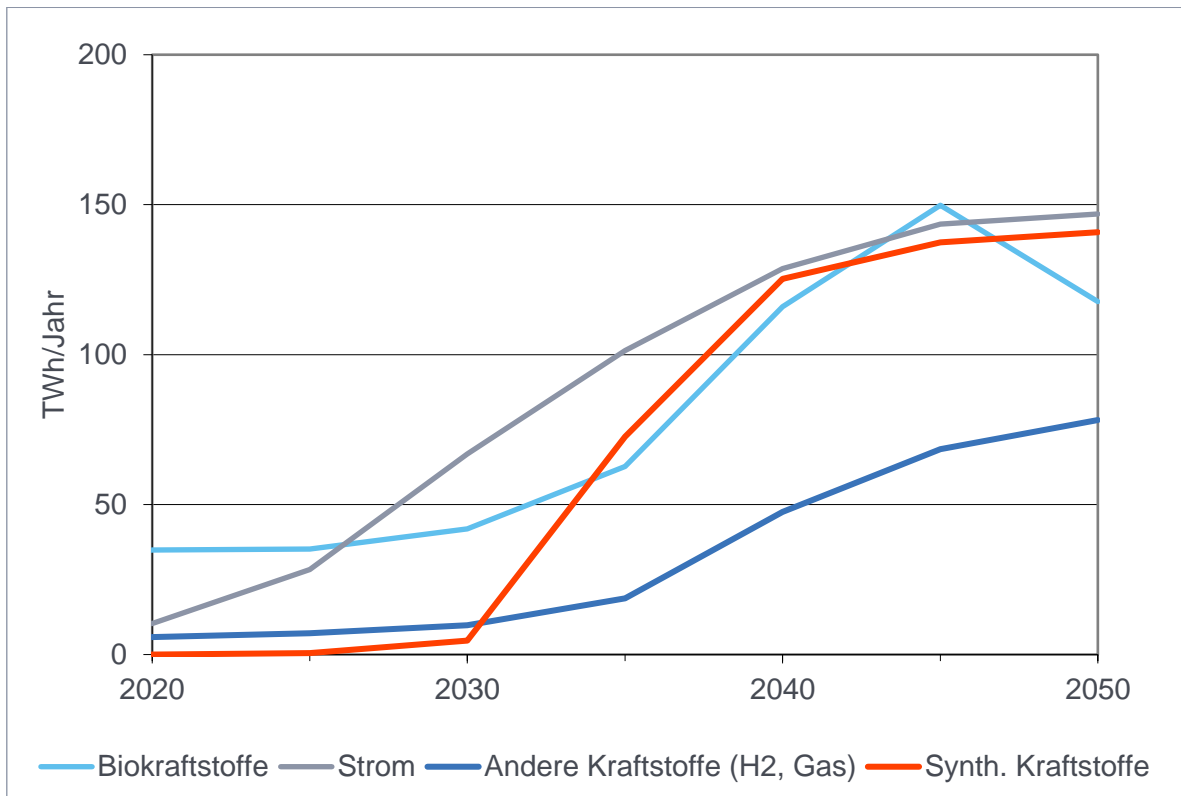


Abbildung 6-18: Energiebedarf des Transportsektors im H2-Szenario

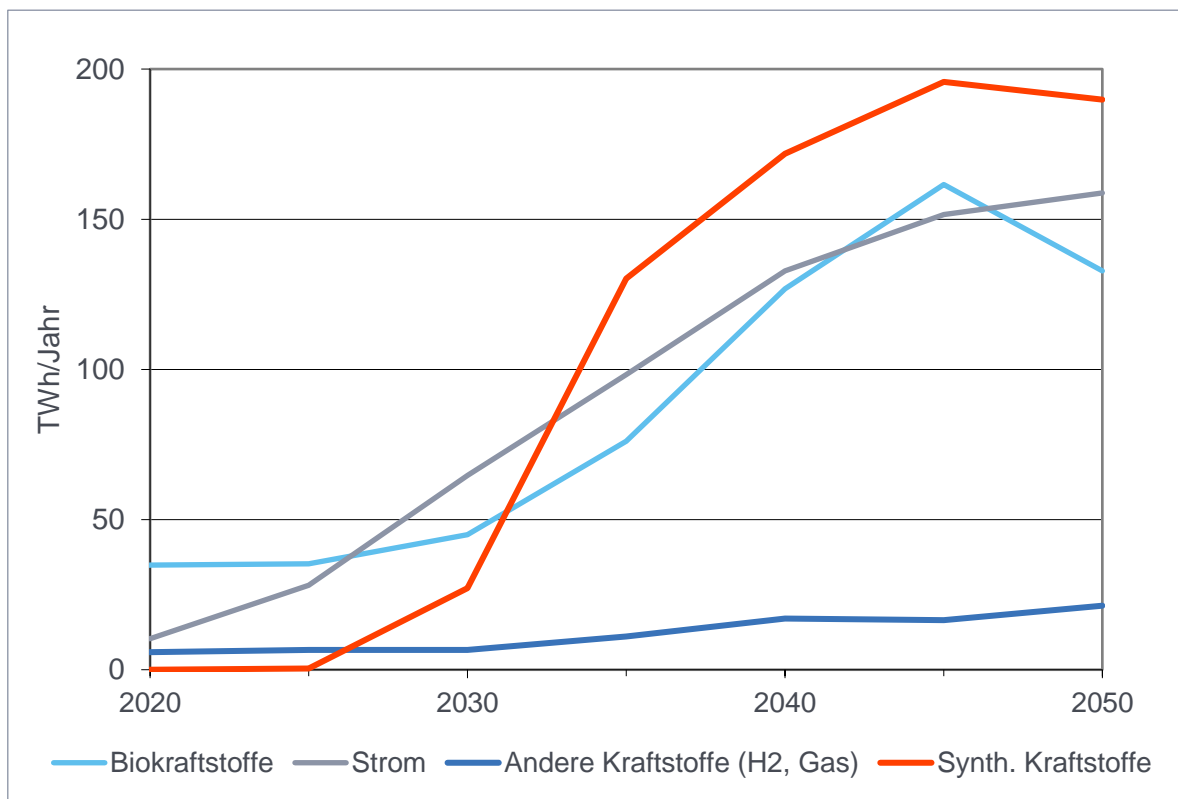
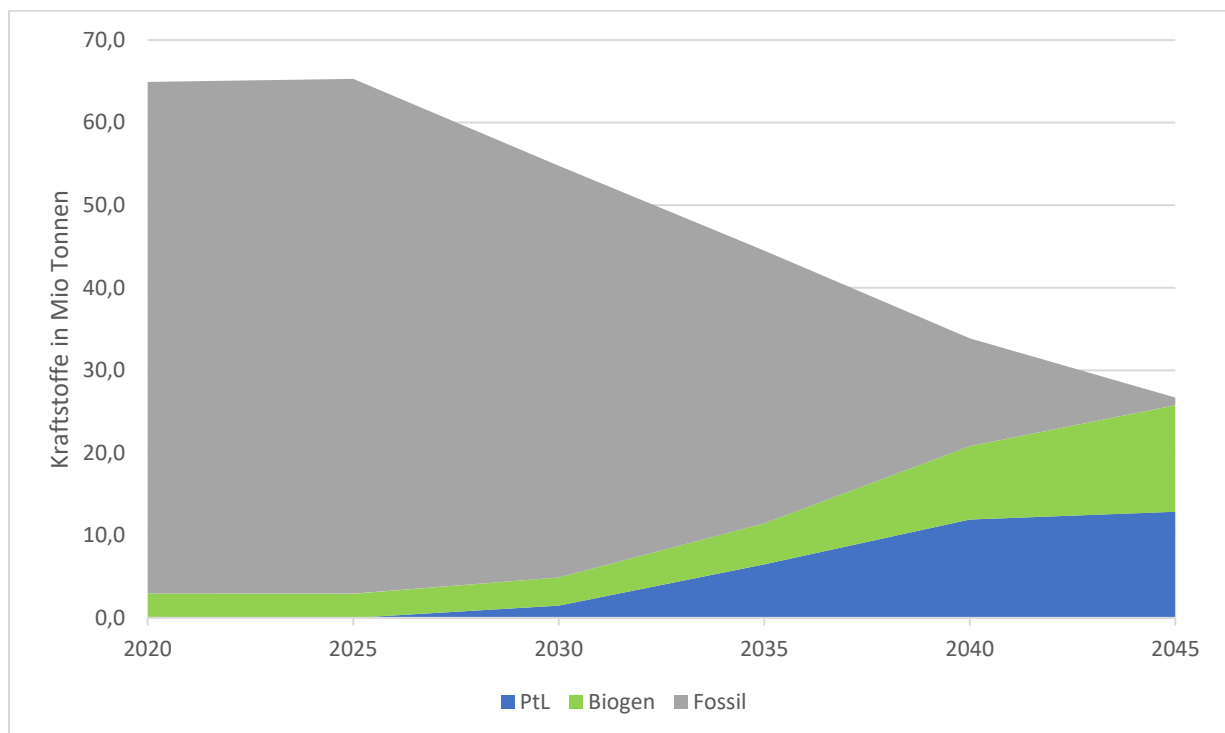


Abbildung 6-19: Energiebedarf des Transportsektors im PtX-Szenario

Die Szenarien gehen dabei davon aus, dass die Beimischung von synthetischen Kraftstoffen über die Zeit kontinuierlich steigt und bis 2045 nur noch bio- und strombasierte Kraftstoffe verwendet werden. Abbildung 6-20 bis Abbildung 6-22 zeigen, wie der Anteil fossiler Kraftstoffe kontinuierlich zurückgeht, bis in 2045 nur noch bio- und strombasierte Kraftstoffe genutzt werden. Die Verläufe sind hier recht ähnlich, nur die absoluten Zahlen verändern sich. Im DEL-Szenario ist der Gesamtbedarf bei 25,7 Mio. Tonnen, die sich hälftig aufteilen. Im H<sub>2</sub>-Szenario liegt die Summe bei 25,6 Mio. Tonnen, wobei hier der biogene Anteil mit 13 Mio. Tonnen etwas größer als der PtL-Anteil ist. Die größte Nachfrage hat das PtX Szenario mit 32 Mio. Tonnen in 2045, hier ist der PtL-Anteil mit 17,5 Mio. Tonnen am größten. In allen Fällen beginnt die Nachfrage zwischen 2025 und 2030 mit dem steilsten Anstieg zwischen 2030 und 2040.



**Abbildung 6-20:** Kraftstoffe nach Quellen im DEL-Szenario in Mio Tonnen



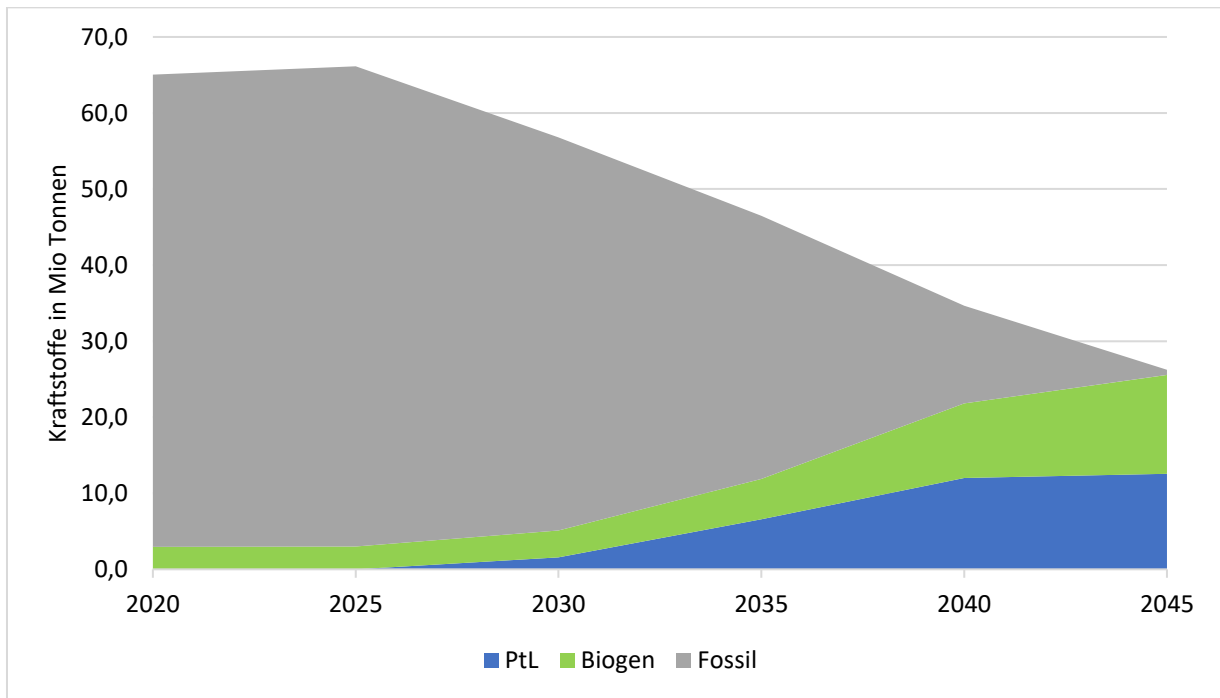


Abbildung 6-21: Kraftstoffe nach Quellen im H<sub>2</sub>-Szenario in Mio Tonnen

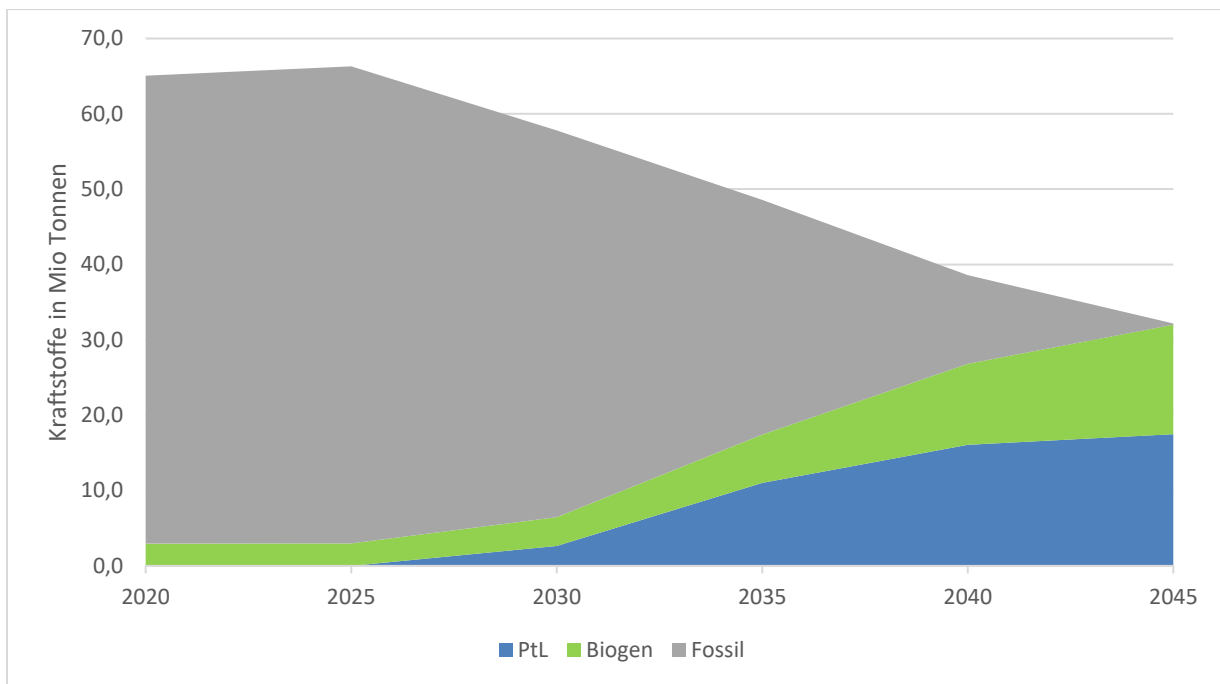
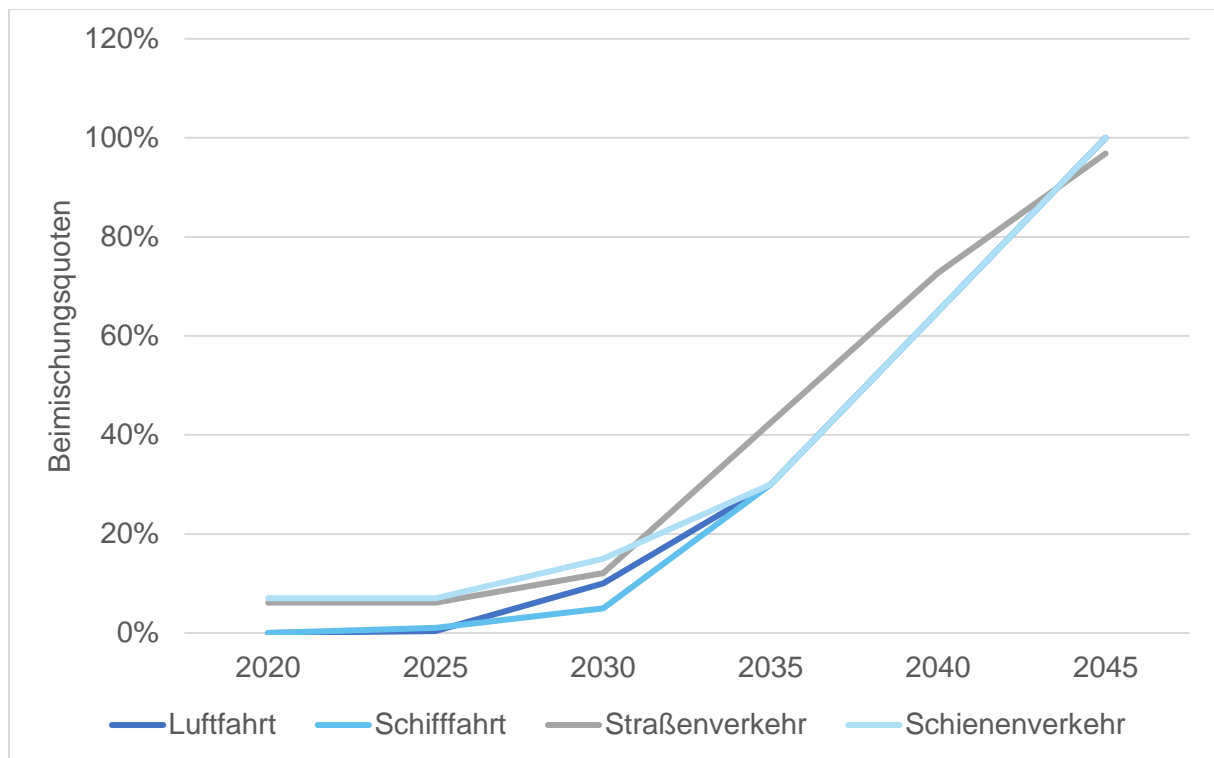


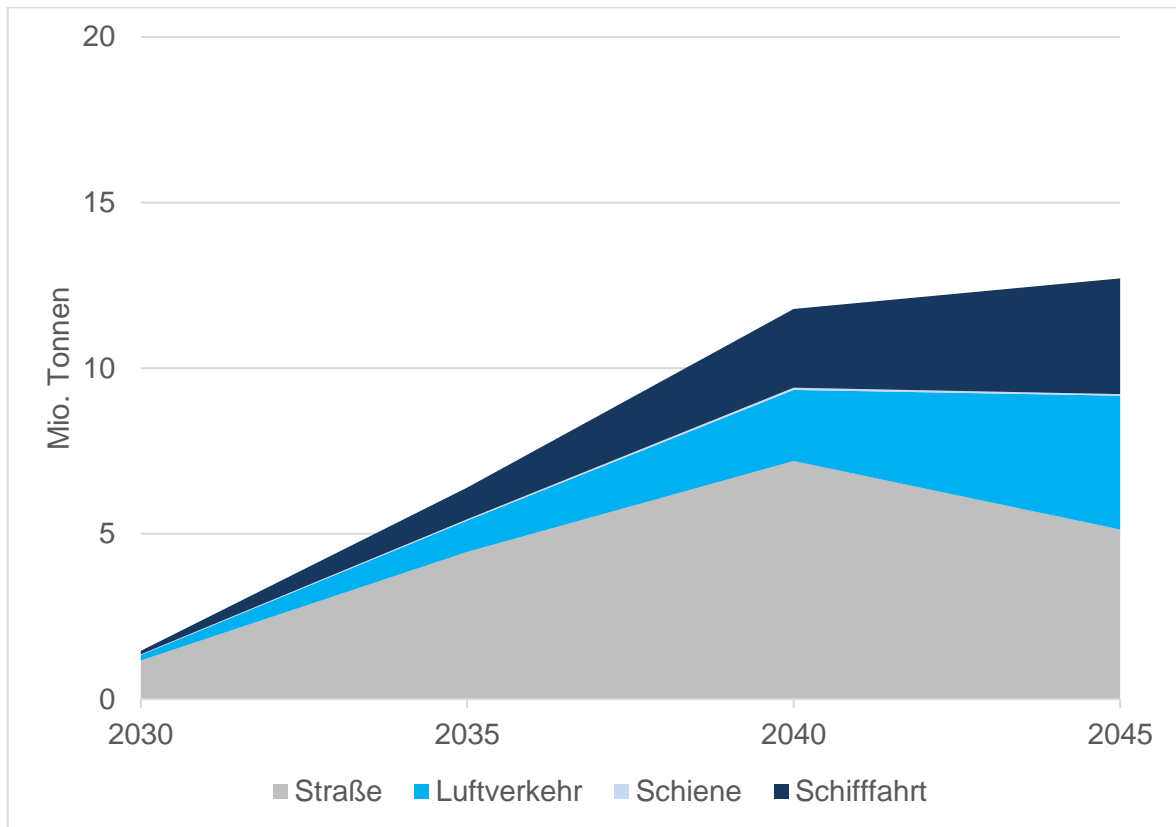
Abbildung 6-22: Kraftstoffe nach Quellen im PtX-Szenario in Mio. Tonnen

In den Szenarien ist ein weitgehend linearer Anstieg der Beimischung von synthetischen Kraftstoffen im jeweiligen Kraftstoffmix angenommen worden, die in der Nachfrage genutzten Anteile synthetischer Kraftstoffe sind in Abbildung 6-23 dargestellt.



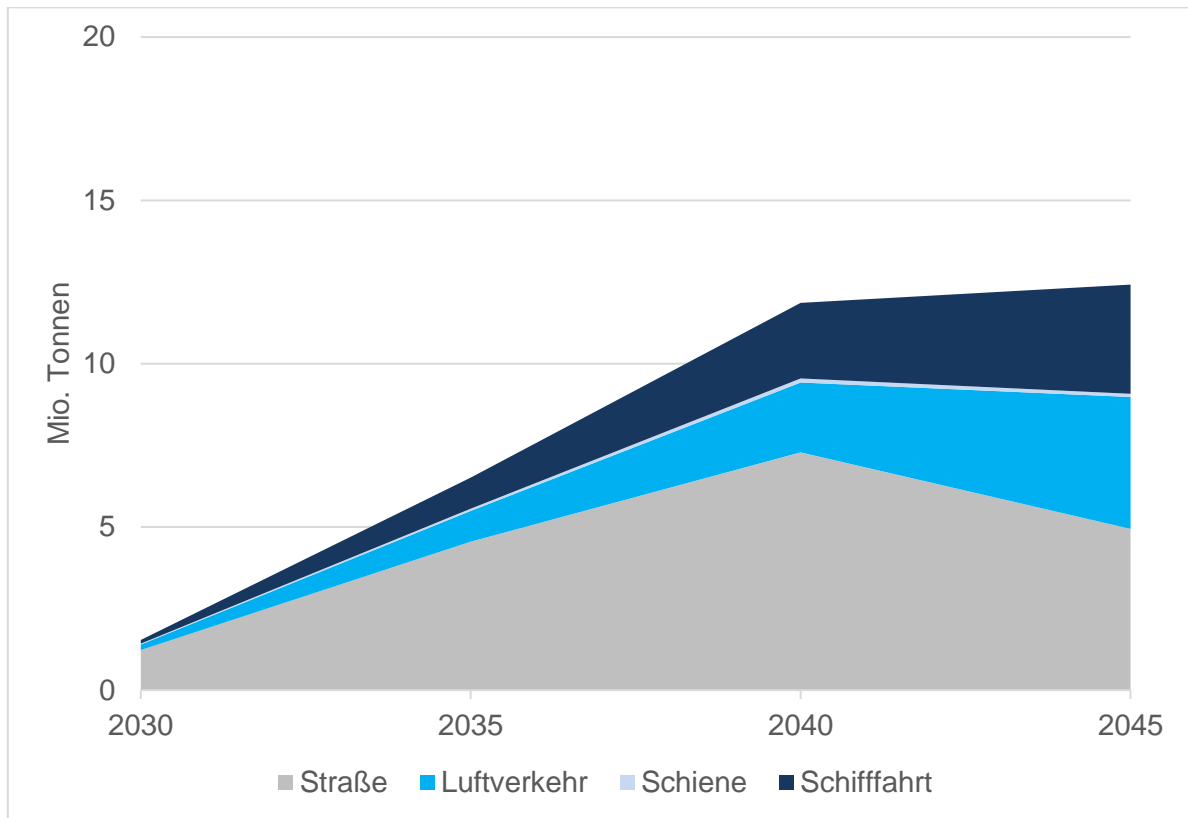
**Abbildung 6-23:** Beimischungsquoten in den verschiedenen Verkehrsbereichen

Der lineare Anstieg der Beimischungsquoten führt allerdings vorerst zu einem stark steigenden Bedarf an synthetischen Kraftstoffen im Straßenverkehr, dies kann in Abbildung 6-24 bis Abbildung 6-26 nachvollzogen werden. Im DEL-Szenario steigt der Bedarf an synthetischen Kraftstoffen auf 7,3 Mio. Tonnen im Straßenverkehr in 2040 um bis 2045 auf 5,2 Mio. Tonnen zurückzugehen.



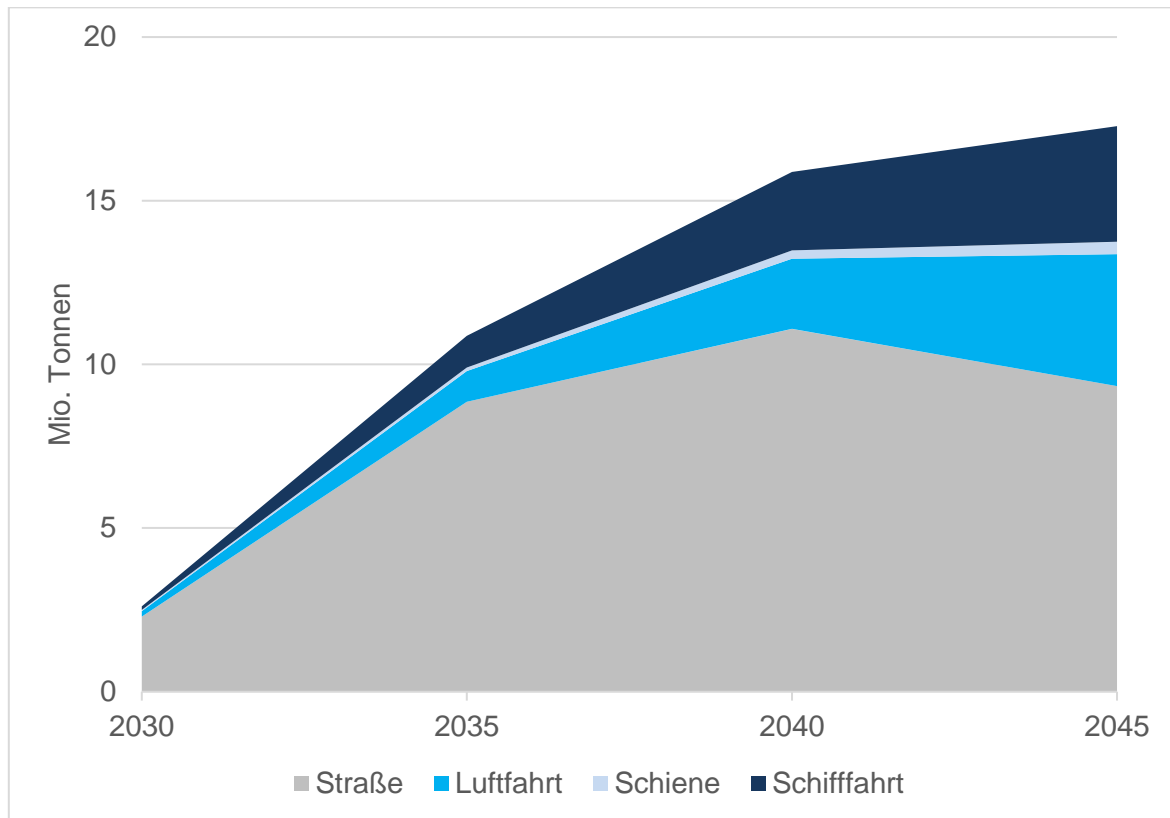
**Abbildung 6-24:** Strombasierte Kraftstoffe nach Verkehrsbereich im DEL-Szenario in Mio. Tonnen pro Jahr

Die Zahlen für das H<sub>2</sub>-Szenario sind sehr ähnlich. In 2040 besteht ein Bedarf von 7,4 Mio. Tonnen im Straßenverkehr, der bis 2045 auf 5,0 Mio. Tonnen zurückgeht.



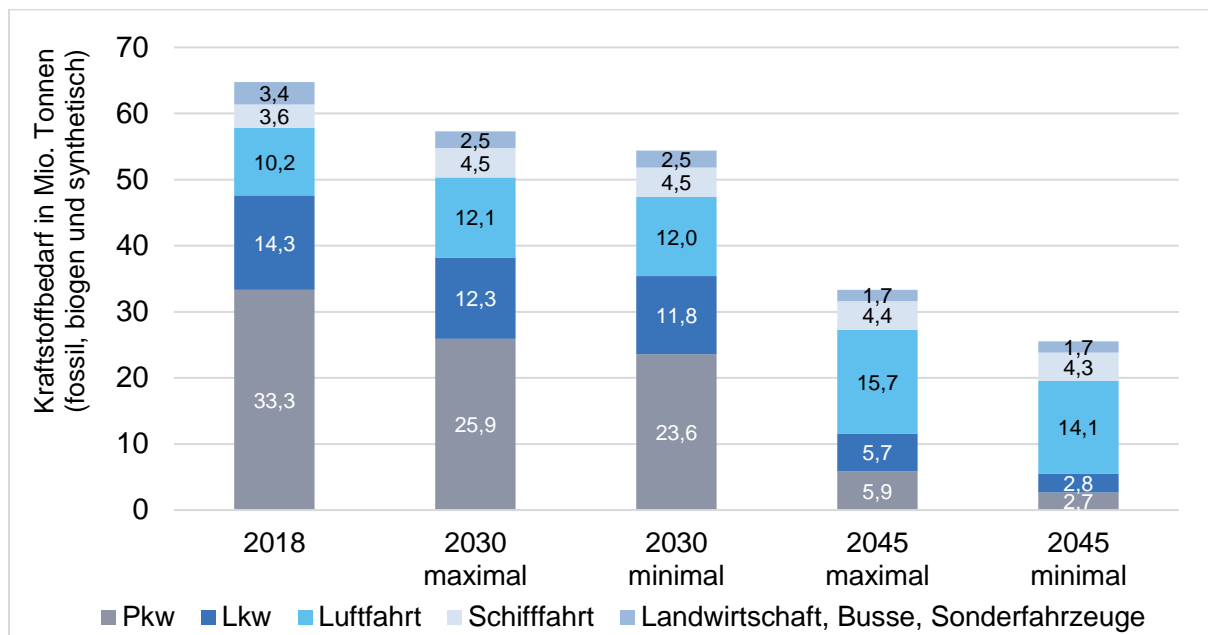
**Abbildung 6-25:** Strombasierte Kraftstoffe nach Verkehrsbereichen im H<sub>2</sub>-Szenario in Mio. Tonnen pro Jahr

Für das PtX-Szenario sind die Zahlen deutlich höher. Der Bedarf an strombasierten Kraftstoffen für den Straßenverkehr liegt im Jahr 2040 bei 11,2 Mio. Tonnen und geht auf 9,4 Mio. Tonnen im Jahr 2045 zurück.



**Abbildung 6-26:** Strombasierte Kraftstoffe nach Verkehrsbereichen im PtX-Szenario in Mio. Tonnen pro Jahr

In Abbildung 6-27 wird der gesamte Kraftstoffbedarf über alle Verkehrsbereiche zusammengestellt. Die maximalen Zahlen stammen aus dem PtX-Szenario zusammen mit der konservativen Entwicklung der Luftverkehrstechnologien. Die minimalen Zahlen stammen aus dem DEL-Szenario mit progressiver Technologieentwicklung im Luftverkehr. Dabei wurden die Zahlen für den Bedarf der Schifffahrt aus den BMWK-Langfristszenarien 3 übernommen [Kraill et al. 2021].



**Abbildung 6-27:** Jährlicher Kraftstoffbedarf der verschiedenen Verkehrsbereiche in Deutschland gemäß BEniVer-Klimaneutralitätsszenarien

Über die verschiedenen Verkehrsbereiche wird davon ausgegangen, dass der Kraftstoffbedarf in den Klimaneutralitätsszenarien, trotz starker Elektrifizierung der Pkw- und Lkw-Flotte, im Jahr 2045 noch bei etwa 24 bis 31 Mio. Tonnen Kraftstoff liegt (fossile, biogene und synthetische Kraftstoffe zusammengefasst). Mit der Zeit verschiebt sich dabei allerdings der Hauptanteil vom Straßenverkehr hin zur schwer elektrifizierbaren Luftfahrt.

Allein der Benzin- und Diesel-Bedarf des Pkw- und Lkw-Verkehrs im klima-ambitioniertesten Szenario (DEL), würde bei den geltenden regulatorischen Bedingungen das CO<sub>2</sub>-Emissionsbudget des gesamten Straßenverkehrs von 85 Mio. Tonnen CO<sub>2</sub>-Äquivalent im Jahr 2030, festgeschrieben im Klimaschutzgesetz [KSG 2021], 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 CO<sub>2</sub>-Ziele des Verkehrssektors im Jahr 2030 zu erreichen. Dabei werden die Emissionen aus dem Stromverbrauch im Verkehr hier nicht abgebildet, sondern nach dem Quellprinzip dem Energiesektor zugeordnet.

## 6.8 Gesamtsystem der Energiebereitstellung

Das Modell „Renewable Electricity Mix for a sustainable energy supply“ (REMIX) ist ein lineares Bottom-Up Energiesystemmodell, das zur zeitlich und räumlich differenzierten Analyse von Langfrist-Energieszenarien mit hohen Anteilen, insbesondere fluktuierender erneuerbarer Energien (fEE) entwickelt wurde. Das Modell ist als lineares Problem formuliert, die zu minimierende Zielfunktion enthält die Systemkosten aus Sicht eines zentralen gesamtwirtschaftlichen Planers. Diese umfassen die anteiligen Investitionen modell-endogen zugebauter Anlagen sowie die Betriebskosten aller Anlagen, einschließlich der Brennstoffkosten und etwaiger Emissionszertifikatskosten. REMIX-OptiMo ist in GAMS implementiert und wird üblicherweise

mit dem CPLEX-Solver gelöst. Eine detaillierte Modellbeschreibung ist in [Gils et al. 2017a] enthalten, frühere Arbeiten zur Sektorenkopplung in [Gils et al. 2017b; Pregger et al. 2019]. In REMix erfolgt unter Berücksichtigung der installierbaren Leistungen und stündlichen Verfügbarkeit von erneuerbaren Energien, eine Bewertung der kostenminimalen Auslegung und des Betriebs des Versorgungssystems.

REMix berechnet auf der Grundlage von GIS-basierten Potenzialanalysen Zeitreihen der potenziellen Stromerzeugung aus fluktuierenden, erneuerbaren Energien. Diese dienen im Rahmen der Systemkostenminimierung zur Ermittlung von Zeitreihen des optimalen Einsatzes der einzelnen Erzeugungstechnologien für Strom, Wärme und Wasserstoff sowie der Lastausgleichsoptionen. Der verwendete Modellierungsansatz ermöglicht auch die Analyse der Ausbauplanung von Erzeugungstechnologien und Lastausgleichsoptionen. Wenn ein Ausbau der Technologien zugelassen ist, kann mit dem Modell die kostengünstigste Kombination der zusätzlich zu installierenden Leistungen und deren Sensitivität hinsichtlich der Anlagenpreise ermittelt werden. Zentrales Element der Bewertung der SynFuel-Produktionspfade ist eine vergleichende Bewertung eines Systems ohne die Herstellung von strombasierten Kraftstoffen und eines mit verschiedenen Produktionspfaden. Der von REMix gewählte Zubau an Erzeugungs- und Transportkapazitäten ist dabei ein wesentliches Kriterium für die Bewertung der Produktionspfade. Über die Ausbauplattform hinaus können die zentralen Parameter des Anlagenbetriebs, wie beispielsweise die Volllaststunden, die Anzahl der Anfahrvorgänge und die Häufigkeit der Abregelung von EE-Anlagen in Abhängigkeit von der Nutzung anderer Technologien bewertet werden. Gemäß dem Fokus des Projekts wurde REMix in BEniVer um Herstellungsprozesse für strombasierte Kraftstoffe ergänzt.

Im vorliegenden Fall fungiert REMix als zentrale Schnittstelle zwischen den unterschiedlichen Bewertungsperspektiven und Modellierungen. Anhand vorgegebener Szenarien des Kraftwerkparks und vorgegebener Strombedarfsprofile wird einerseits der stündliche Einsatz der betrachteten Technologien und andererseits die benötigte Systemflexibilität, mittels Ausbauplanung für die miteinander konkurrierenden Lastausgleichsoptionen, bestimmt. Das Kraftwerkseinsatzmodell berücksichtigt dabei Kostenaufschläge beim Lastwechsel, um den Effekt eines häufigen starken Hoch- und Herunterfahrens von Kraftwerksleistung zu beschränken. Zentrales Ergebnis ist ein aus volkswirtschaftlicher Sicht optimiertes Stromversorgungssystem, welches für mehrere Zeithorizonte in der Zukunft für Europa ermittelt wird.

### **Genutzte Lastausgleichsoptionen**

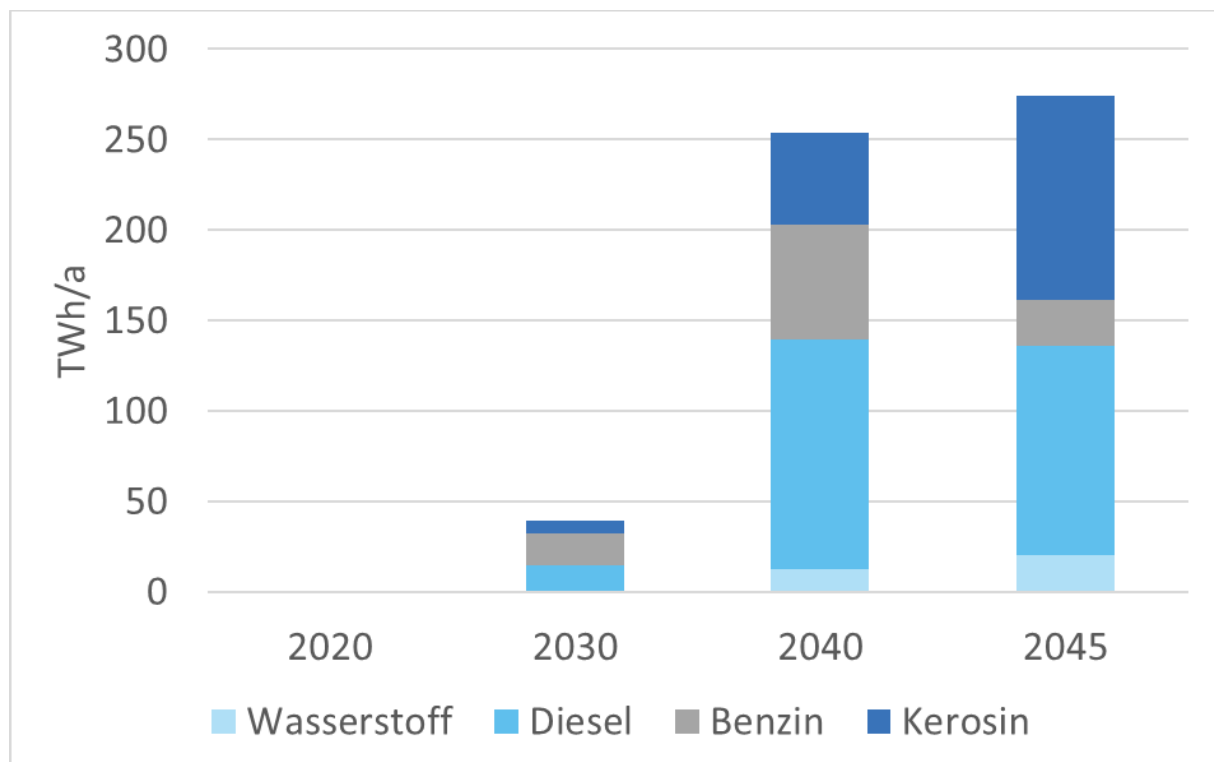
In REMix bestehen unterschiedliche Möglichkeiten, Lastausgleichsoptionen modellexogen vorzugeben oder -endogen einen Ausbau zu optimieren. Für Strom- als auch für Wärmespeicher wird eine Ausbauplanung durchgeführt. In Bezug auf erstere betrifft dies Pumpspeicherkraftwerke, Lithium-Ionen-Batteriespeicher und Druckluftspeicher. Als Wärmespeicher kommen vornehmlich Warmwasserspeicher unterschiedlicher Bauart zum Einsatz. Ihre technische Charakterisierung unterscheidet sich abhängig von ihrem Einsatz als Pufferspeicher für Fernwärme, industrielle Prozesswärme oder Kleinspeicher im Haushaltsbereich.

### 6.8.1 Kumulierter Bedarf an H<sub>2</sub> und strombasierten Kraftstoffen im Verkehrssektor

Abbildung 6-28 zeigt den Bedarf des Verkehrssektors im PtX-Szenario für die Stützjahre 2020, 2030, 2040 und 2045, wie er im Modell REMix abgebildet ist. Der Kraftstoffbedarf ist für das Jahr 2040 am höchsten und wird vom Bedarf an synthetischem Diesel und Benzin dominiert. Es gibt kleinere Bedarfe für Wasserstoff und Kerosin. Zum Jahr 2050 geht vor allem der Benzinbedarf durch die bis dahin stillgelegten Altfahrzeuge zurück. Beim Diesel ist der Effekt weniger stark. Dafür steigt der Bedarf an Kerosin und Wasserstoff weiter an.

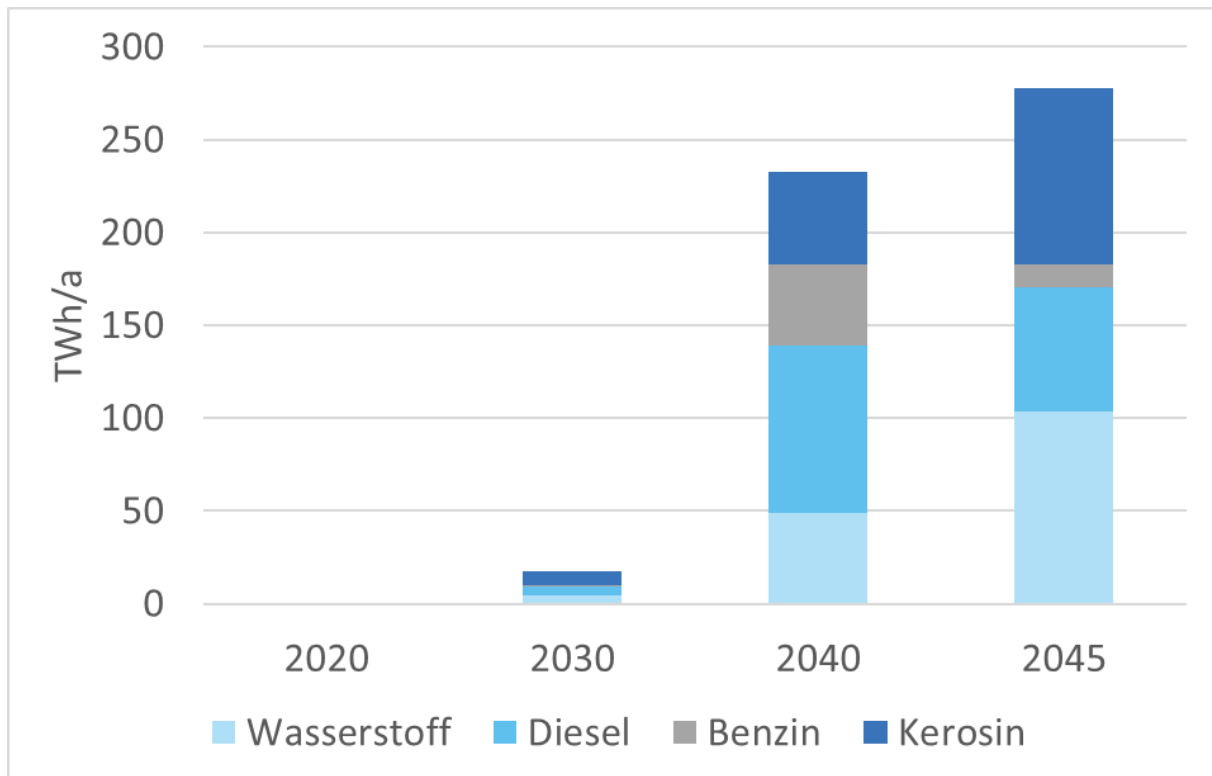
Im Wasserstoff-Szenario in Abbildung 6-29 gibt es einen reduzierten Bedarf an Benzin, Diesel und Kerosin, der Spitzenbedarf im Jahr 2040 geht von 254 TWh auf 232 TWh pro Jahr zurück. Auch steigt der Anteil des Wasserstoffs deutlich an. Auch im Jahr 2030 gibt es insgesamt noch einen deutlich geringeren Bedarf.

Im direktelektrischen Szenario (DEL) in Abbildung 6-30 liegt der Kraftstoffbedarf noch mal niedriger, im Jahr 2040 sind es in dem Fall nur 197 TWh. Der Anteil des Wasserstoffs ist sogar noch geringer als im PtX-Szenario. Im Jahr 2045 dominiert Kerosin den Bedarf an Kraftstoffen.

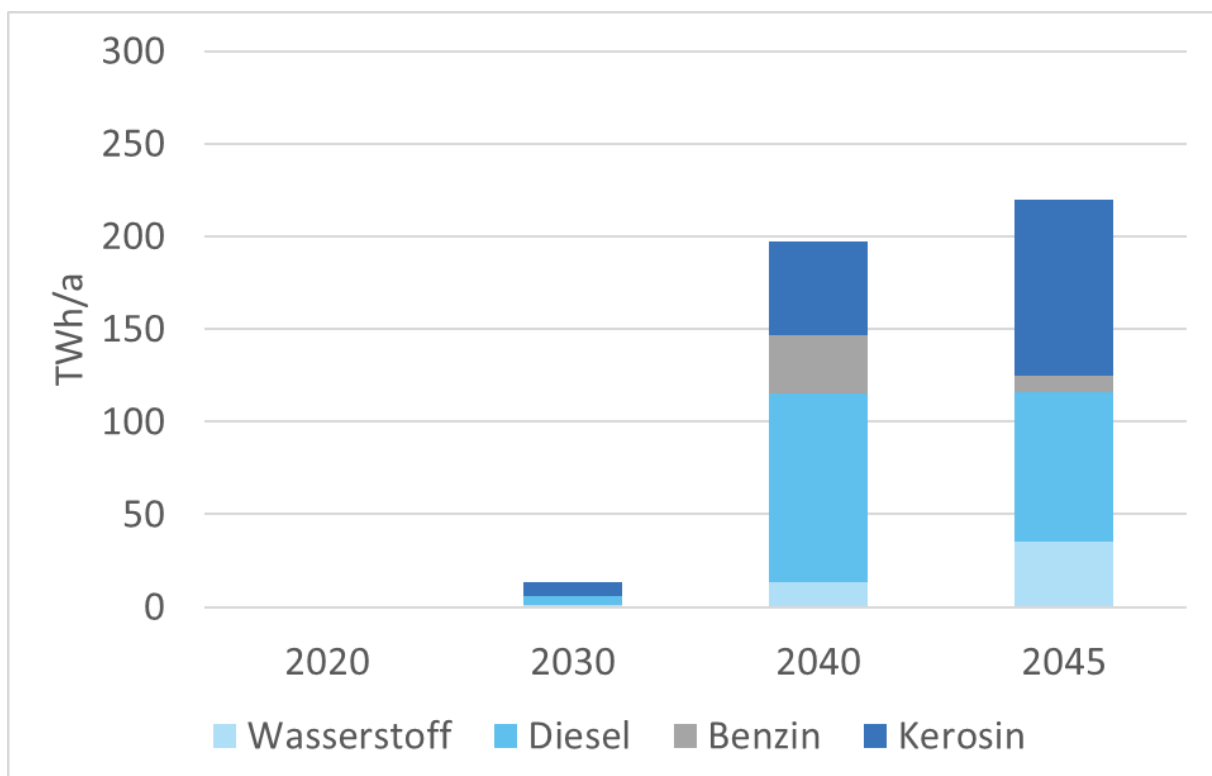


**Abbildung 6-28:** Bedarf an aus erneuerbarem Strom erzeugten Kraftstoffen für Deutschland im PtX-Szenario





**Abbildung 6-29:** Bedarf an aus erneuerbarem Strom erzeugten Kraftstoffen für Deutschland im H<sub>2</sub>-Szenario



**Abbildung 6-30:** Kraftstoffbedarf für Deutschland im DEL-Szenario

### **6.8.2 Bereitstellungsoptionen zur Deckung des Kraftstoffbedarfs**

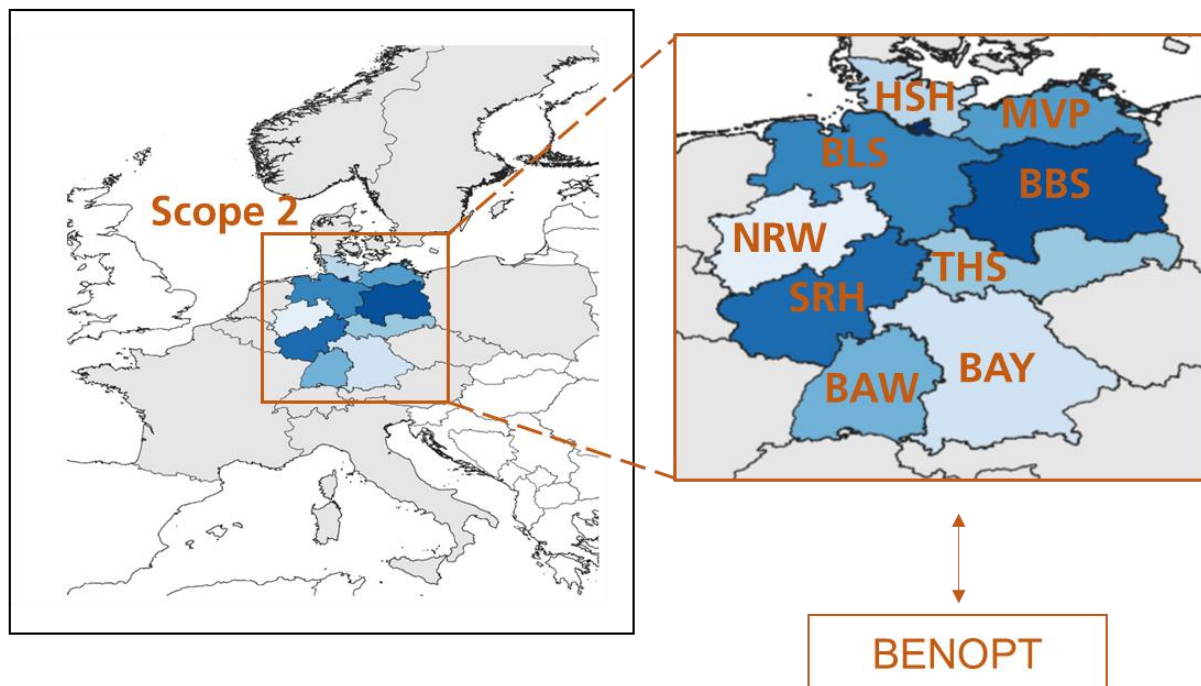
Für die Bereitstellung der Kraftstoffe sind unterschiedliche Optionen denkbar. Dies sind die Herstellung strombasierter Kraftstoffe (Renewable Fuel of Non-Biological Origin, RFNBOs) in Deutschland, der Import strombasierter Kraftstoffe nach Deutschland von außerhalb Europas und die Bereitstellung von biogenen Kraftstoffen, basierend auf biogenen Reststoffen und nachhaltigem Anbau. Die Analyse dieses Spannungsfeldes kann auch auf Basis der Szenarien REF, DEL, H2 und PtX erfolgen. Methodisch erfolgt die Analyse mithilfe eines Modellsystems bestehend aus zwei gekoppelten Optimierungsmodellen: REMix für die zeitlich und räumlich aufgelöste Betrachtung des Stromsystems und BENOPT für die Untersuchung einer Vielzahl von biogenen und strombasierten Optionen zur Bereitstellung von Kraftstoffen.

Ziel der Analyse ist die Darstellung der Auswirkungen der in Kapitel 6.8.1 skizzierten Endenergie-Nachfrageszenarien auf mögliche Systeme der Energieversorgung, unter Maßgabe absoluter Emissionsgrenzwerte in den entsprechenden Zieljahren (2030, 2040 und 2045). Es wird außerdem anhand der beiden Szenarien REF und PtX dargestellt, inwiefern eine Nutzung von biogenen Kraftstoffen die Nachfrage nach in Deutschland erneuerbar produziertem Strom einerseits und die Importabhängigkeit andererseits reduzieren kann.

Weil in REMix, im Gegensatz zu den Analysen aus Kapitel 6.7, das deutsche Stromsystem in stündlicher Auflösung berechnet wird, lassen sich Rückschlüsse auf die Bedarfe an Flexibilität über kurze Zeiträume (Batteriespeicher, Lastverschiebung durch E-Pkw) und lange Zeiträume (H<sub>2</sub>- und CH<sub>4</sub>-Kavernenspeicher) ziehen. Durch die räumliche Auflösung Deutschlands in neun Modellknoten ergeben sich außerdem Einsichten in die Verteilung der Kraftwerks- und Netzinfrastruktur sowie der Technologien zur Bereitstellung von H<sub>2</sub>.

Zur Optimierung der Rechenzeit wurde bei der Modellierung ein genesteter Ansatz gewählt. Im ersten Schritt wird ein räumlich gröber aufgelöstes Modell von Deutschland und seinen Nachbarn im Scope 1 in einer zeitlichen Auflösung von vier Stunden berechnet. Dieses Modell dient als Rahmen für ein feiner aufgelöstes Modell für Deutschland in Scope 2, wobei die Grenzflüsse hier als externe Annahmen gesetzt werden. Dies ist in Abbildung 6-31 dargestellt.

## Scope 1



**Abbildung 6-31:** Geographische Bezüge (Scopes) der REMix-Rechnungen und Bezeichnungen der Modellregionen.

Scope 1 enthält über die dargestellten europäischen Nachbarn Deutschlands auch Spanien, Portugal, das Vereinigte Königreich, Italien, Finnland und das Baltikum. Die zeitliche Auflösung in Scope 1 ist 4 h (2.190 Zeitschritte pro Jahr). Für Scope 2 werden Stromimporte nach und Stromexporte aus Deutschland, basierend auf Scope1-Ergebnissen, exogen vorgegeben. Die zeitliche Auflösung variiert. Die ersten Läufe der Modellkopplung REMix-BENOPT werden in einer Auflösung von 24 h durchgeführt. Nach ausreichender Konvergenz (ca. 4-6 Modellläufe mit einem Konvergenzfehler <10 %) wird die zeitliche Auflösung auf 1 h erhöht.

### **6.8.3 Modellergebnisse bei weitgehender Vernachlässigung von biogenen Kraftstoffen für den Verkehrssektor**

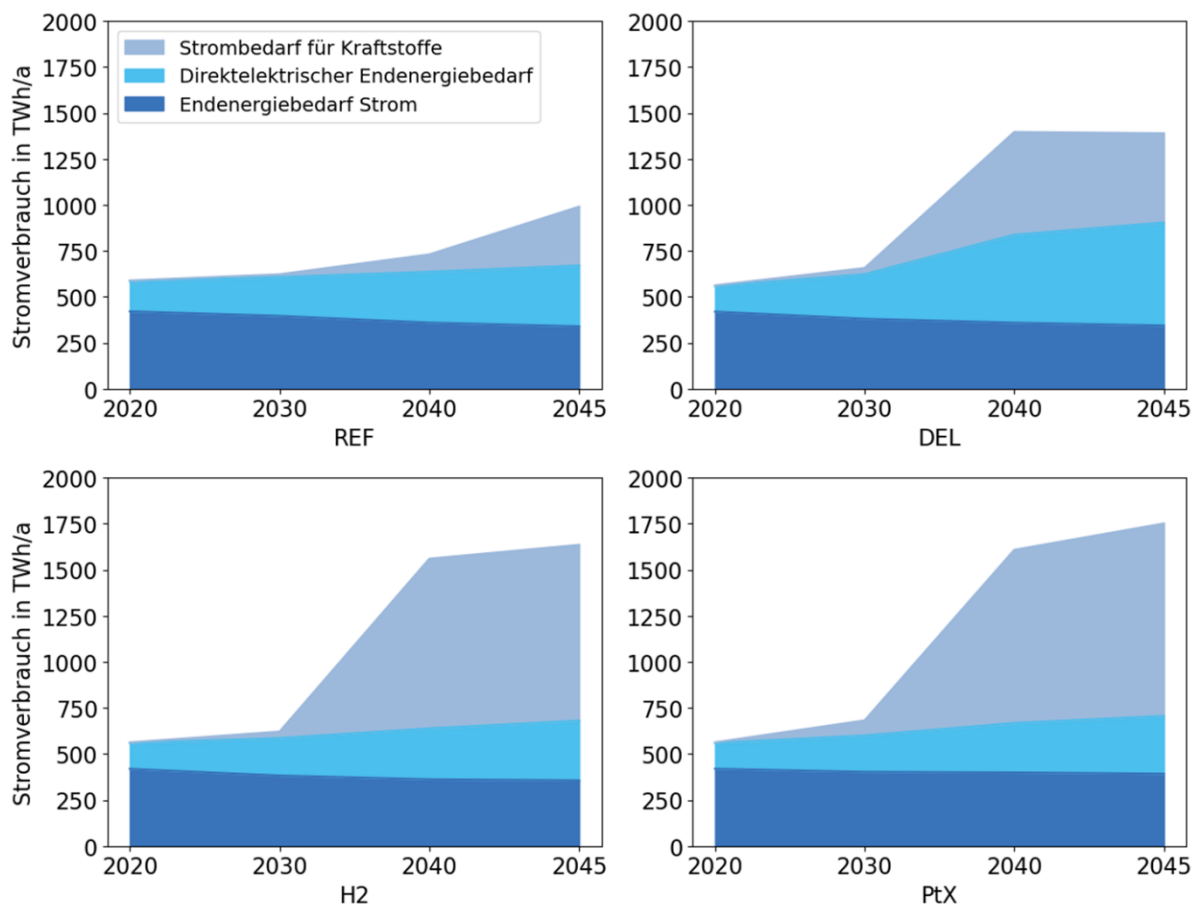
Im Folgenden werden die Ergebnisse der Scope 1-Berechnungen vorgestellt, die von einer weitgehenden Deckung der Endenergienachfrage im Verkehrssektor durch strombasierte Kraftstoffe ausgehen. Diese können entweder importiert<sup>21</sup> oder in Deutschland auf der Basis von erneuerbaren Energien erzeugt werden. Die Zusätzlichkeitsprinzipien des Delegated Act der Europäischen Kommission sind dabei nicht im Modell als Vorgabe implementiert, weil das Modell den Betrieb von Kraftwerken und Elektrolyseuren preisgetrieben optimiert. Die Vorgaben des Delegated Acts schränken den systemdienlichen Betrieb stark ein und waren zum Zeitpunkt des Modellaufbaus noch in der Diskussion. Da das Modell im Ausgleich von Angebot und Nachfrage die jeweils günstigsten Strombereitstellungstechnologien einsetzt, kann es dazu kommen, dass in wenigen Stunden auch Gas- und Kohlekraftwerke als Stromquellen für

<sup>21</sup> Es wurden Kosten und Potenziale für den Import von strombasierten Kraftstoffen basierend auf Berechnungen im Forschungsprojekt MENA-Fuels (FKZ 03EIV181) angenommen.

die Wasserstofftechnologien genutzt werden. Der Einsatz fossiler Kraftwerke wird aber durch die maximal erlaubten Emissionen insgesamt begrenzt.

### 6.8.3.1 Entwicklung der Stromnachfrage in Deutschland

Der nachfolgend beschriebene Strombedarf ergibt sich weitgehend durch die exogen vorgegebenen Endenergienachfragen, die in den Modellen VECTOR21, 4DRACE und LENS ermittelt wurden. Einige Stromnachfragen werden zusätzlich endogen im Modell berechnet. Im Wärmesektor gibt es Freiheitsgrade der Technologieauswahl, welche die Stromnachfrage beeinflussen. Ebenso tragen Verluste im Strom- und Gastransport sowie der Speicherung – in Batterie- oder noch verlustreicher in H<sub>2</sub>-Speichern – zur Stromnachfrage bei. Für die Kraftstoffherstellung hängt die Stromnachfrage vom Anteil der importierten Kraftstoffe ab, welcher im Modell optimiert wird. Abbildung 6-32 gibt die resultierenden Werte für die vier betrachteten Szenarien wieder.



**Abbildung 6-32:** Modellierter Stromnachfrage differenziert nach klassischer Endenergienachfrage, Strombedarf für neue direktelektrische Anwendungen und Strombedarf für die Erzeugung gasförmiger oder flüssiger synthetischer Energieträger

Direktelektrische Anwendungen umfassen batterieelektrische Fahrzeuge, Plug-In-Hybride, Industrie- und Gebäude-Wärmepumpen, elektrische Boiler für Gebäude und Industrie sowie Verluste durch Batterie- und Pumpspeicher. Der Strombedarf für Kraftstoffe ergibt sich aus

dem Strombedarf für alkalische und PEM-Elektrolyseure, Direct-Air-Capture-Anlagen sowie in geringem Umfang für die Syntheseanlagen (Raffinerien). Der Strombedarf für die Kompression von Gasen für Speicherung und Verteilung wird dem Strombedarf für Kraftstoffe zugeordnet.

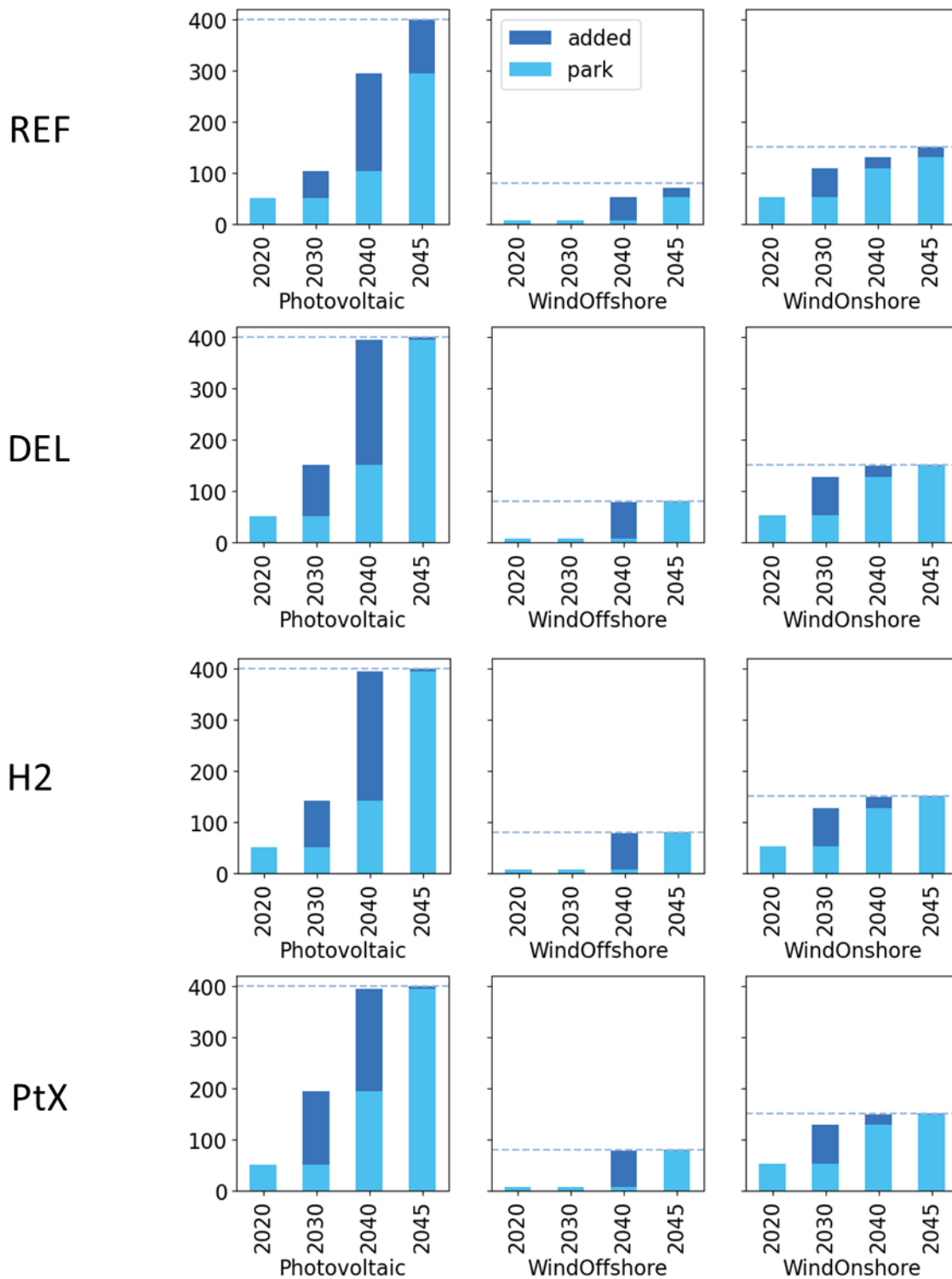
Das Referenz-Szenario zeigt einen zunehmenden Bedarf nach Strom für direktelektrische Anwendungen (auf ca. 400 TWh für E-Pkw und Wärmeanwendungen in 2045), während der klassische Endenergiebedarf nach Strom durch Effizienzsteigerung in Industrie und Haushalten leicht abnimmt. Ab 2030 steigt der Strombedarf in diesem Szenario für die Herstellung von Wasserstoff, zum einen für die Deckung einer entsprechenden Endenergienachfrage (ca. 60 TWh) und zum anderen als Ausgangsstoff für die Herstellung von strombasiertem Diesel, Benzin und Kerosin (ca. 160 TWh). Im Jahr 2045 beträgt der Anteil der Stromnachfrage für die Wasserstoffherstellung ca. ein Drittel des gesamten Strombedarfs.

Im direktelektrischen Szenario wird die Endenergienachfrage vor allem durch E-Pkw und Wärmepumpen gedeckt, was zu einem starken Anstieg des Strombedarfs für diese Anwendungen auf ca. 560 TWh führt (fast 40 % der gesamten Stromnachfrage in 2045). Insbesondere die Nachfrage nach Wasserstoff steigt zwischen 2030 und 2040 sprunghaft an und wächst bis 2045 dann nur noch leicht mit ca. 540 TWh auf einen ähnlichen Anteil.

Die Tendenz ist ähnlich für die Szenarien H<sub>2</sub> und PtX, aber mit geringerer direkter Elektrifizierung und damit steigender Stromnachfrage. Der Strombedarf für direktelektrische Anwendungen steigt auf 320 und 310 TWh bzw. ca. 20 % in 2045 in beiden Szenarien. Die sprunghaften Anstiege in der Stromnachfrage sind in den drei Szenarien auf die stark steigende Nachfrage nach synthetischen Kraftstoffen in den Jahren 2030 bis 2040 zurückzuführen. Diese steigt von etwa 5-30 TWh/a in 2030 auf etwa 130-170 TWh/a an (vgl. Abbildung 6-28, Abbildung 6-29 und Abbildung 6-30).

### 6.8.3.2 **Kraftwerke: Kostenoptimale Zubaudynamiken in den vier Szenarien**

Abbildung 6-33 stellt den kostenoptimalen Zubau an Kraftwerkskapazitäten für die Nutzung der variablen Sonnenenergie und Windkraft dar. Alle vier Szenarien erreichen den maximalen Zubau im Rahmen der vorhandenen Potenziale für Photovoltaikanlagen und Windkraft an Land aus dem Netzentwicklungsplan in 2045, die ambitionierteren Szenarien DEL, H<sub>2</sub> und PtX bereits 2040. Darüber hinaus muss in diesen Szenarien auch die Windkraft auf See bereits bis zum Jahr 2040 bis zum technischen Potenzial ausgebaut werden, um die höhere Nachfrage nach H<sub>2</sub>-basierten Energieträgern zu decken. In allen Szenarien decken Windkraftanlagen an Land einen Großteil der kurzfristigen, zusätzlichen Strombedarfe, wohingegen Photovoltaikanlagen und Windkraftanlagen auf See vor allem bis 2040 ausgebaut werden.



**Abbildung 6-33:** Zubau an Photovoltaik sowie Windkraftanlagen an Land und auf See aggregiert für Deutschland in GW installierte Nennleistung.

Die gestrichelten Linien markieren den angenommenen Zubau im Netzentwicklungsplan, der hier als Maximum angesetzt wird. In Hellblau sind jeweils die aus den Vorjahren zugebauten Kapazitäten angegeben, die zu Beginn der Optimierung verfügbar sind, in Dunkelblau der Zubau im jeweiligen Jahr.

### 6.8.3.3 Importe von strombasierten Kraftstoffen

Die Kosten und Volumina der Importe von mit erneuerbarer Energie erzeugtem Wasserstoff und SynCrude werden basierend auf den Annahmen aus dem Vorhaben MENA-Fuels (FKZ: 03EIV181) angesetzt. Dabei stellen globale, technische Potenziale für solarthermische Kraftwerke, Photovoltaik- und Windkraftanlagen, unter Berücksichtigung von Ausschlussflächen, technische und ökonomische Annahmen zur Erzeugung von Wasserstoff und SynCrude sowie Annahmen zu CO<sub>2</sub>-Bereitstellungskosten aus Industrie und Direct-Air-Capture (DAC), Transportkosten und Importzölle, die Grundlage für Gebote auf dem globalen Rohstoffmarkt dar. Diese Gebote werden für die Arbeiten in BEniVer zu dynamischen energieträgerspezifischen Kostenpotenzialkurven in 50 €/MWh-Schritten zusammengefasst. Zusätzlich wird neben den in der globalen Betrachtung bei MENA-Fuels untersuchten Energieträgern Wasserstoff und SynCrude von zusätzlichen Verarbeitungsschritten in den Herstellungsländern ausgegangen, sodass auch Potenziale für Methan, synthetisches Benzin, Diesel und Kerosin überschlägig abgeschätzt werden.

Anders als in MENA-Fuels wird angenommen, dass die globalen Potenziale in jeder Kostenkategorie bevölkerungsanteilig (basierend auf den heutigen Bevölkerungsanteilen) genutzt werden können, also ca. 1 % für Deutschland bzw. 6 % für die anderen EU-Länder. Es wird das REF-Szenario aus MENA-Fuels gewählt, welches das Investitionsrisiko in Form durchschnittlich gewichteter Kapitalkosten für alle Länder als gleich gegeben unterstellt. Außerdem wird in BEniVer ein Import nur über die Seeroute und nicht über Pipelinetransport angenommen. Die gewählte Importmenge stellt einen Freiheitsgrad im Optimierungsmodell REMix dar, so dass die günstigste Option (Import oder Herstellung in Deutschland) in jedem berechneten Jahr genutzt wird, um die Energienachfrage in Deutschland zu decken.

Dieser Ansatz enthält einige Unsicherheiten und Vereinfachungen. So wird in der hier vorgenommenen Modellierung der Handel zwischen Weltregionen anhand eines zentralen Planers des europäischen Stromsystems entschieden. In offenen Märkten werden sich die Handelsvolumina nicht nach globalen Bevölkerungsanteilen richten, sondern nach dem größten Bedarf, den zahlungskräftigsten Käufern, aber auch individuellen historischen Handelsverflechtungen. Die bevölkerungsanteilige Verteilung der Potenziale unterstellt, dass langfristig jedem Menschen das gleiche Anrecht auf synthetische Kraftstoffe zugesprochen wird und folgt damit der Annahme einer fairen Zukunftswelt. Länderspezifische Risiken können zudem einen starken Einfluss auf kostenoptimale Importstrategien haben. Für eine detailliertere Betrachtung dieser Faktoren verweisen wir auf Kapitel 8.3 und den MENA-Fuels Abschlussbericht (siehe <https://wupperinst.org/p/wi/p/s/pd/789/>).

Im Jahr 2045 importiert Deutschland in den verschiedenen Szenarien 0 bis 420 TWh/a Wasserstoff und 110 bis 195 TWh/a flüssige strombasierte Energieträger. Die Nachfrage nach elektrisch hergestelltem Kerosin wird in allen Szenarien größtenteils aus Importen (70 bis 100 TWh/a) gedeckt, wobei 10 bis 30 TWh/a in den drei Zielerreichungsszenarien DEL, H2 und PtX in deutschen Raffinerien hergestellt werden.

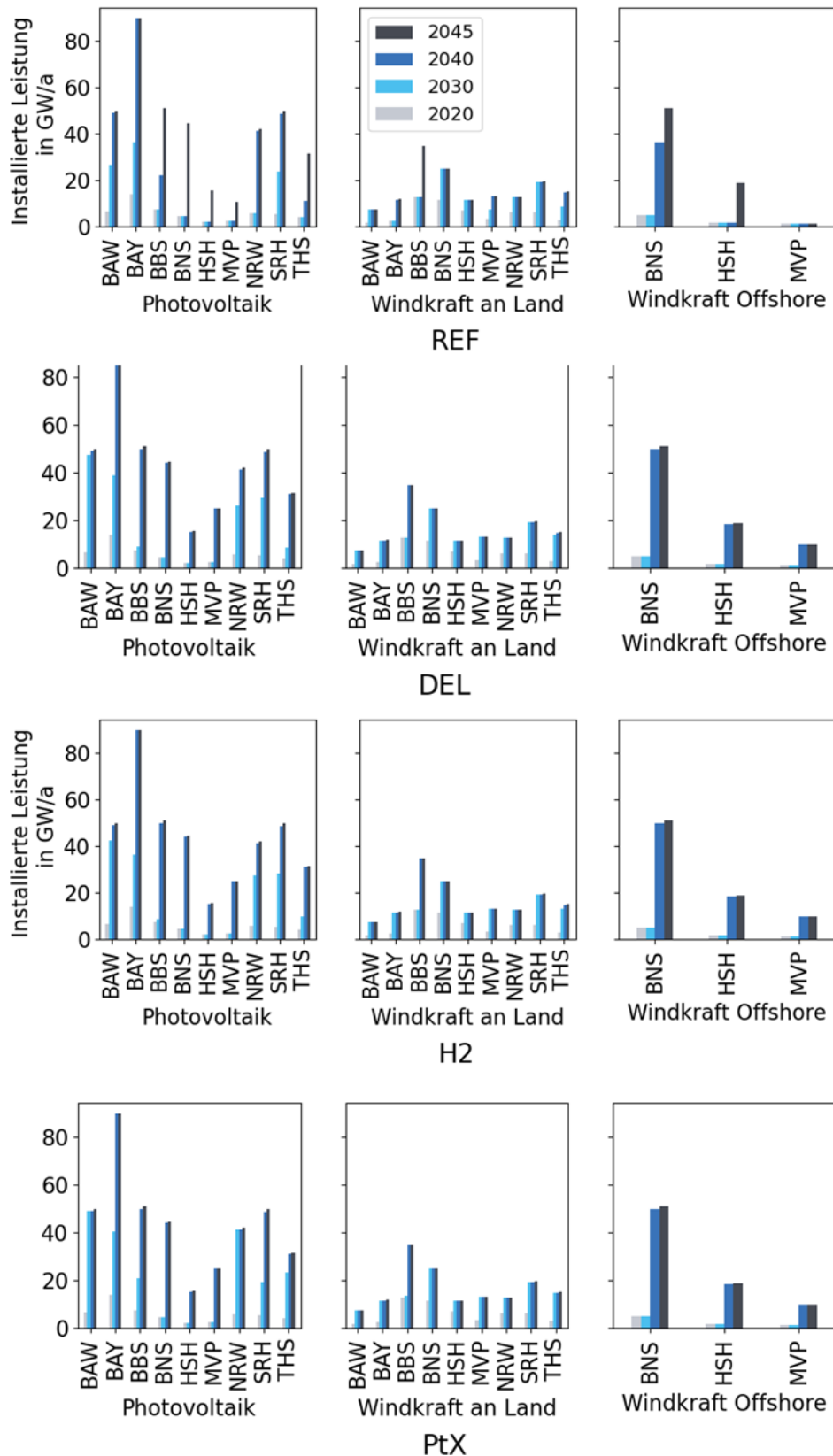
Der Gesamt-Importanteil für strombasierte Kraftstoffe im Jahr 2045 unterscheidet sich in den Szenarien relativ stark. Im REF-Szenario wird fast kein Wasserstoff importiert, flüssige strombasierte Kraftstoffe für den Straßenverkehr zu ca. 20 % und Kerosin zu ca. 75 %. In den Zielerreichungs-Szenarien erhöhen sich die Importanteile. Wasserstoff wird zu 20-30 % importiert,

Diesel und Kerosin werden zu 70-90 % importiert, wobei die Importanteile im DEL-Szenario etwas niedriger ausfallen, weil die Endanwendungen größtenteils direkt elektrifiziert werden und dadurch mehr Strom aus Deutschland für die Bereitstellung von strombasierten Kraftstoffen zur Verfügung steht. Benzin wird weitestgehend in Deutschland hergestellt. Flüssige strombasierte Kraftstoffe (Diesel, Benzin und Kerosin) werden im Umfang von ca. 40-100 TWh in Deutschland bereitgestellt.

#### 6.8.3.4 **Der kostenoptimale Ausbau erneuerbarer Kraftwerke in Deutschland**

Das für BEniVer gewählte REMix-Modell ist innerhalb Deutschlands in neun Modellknoten aufgelöst, die sich grob an den politischen Grenzen der Bundesländer orientieren. Dadurch können Rückschlüsse auf die geographische Verteilung von Stromerzeugung, Wasserstoffherzeugung, Raffineriekapazitäten und notwendigen Übertragungskapazitäten gezogen werden.





**Abbildung 6-34:** Notwendige Kapazitäten für EE-Strom in Deutschland, regional verteilt (Bezeichnung der Modellknoten vgl. Abbildung 6-31) in den vier Szenarien. Gezeigt sind nur die drei wesentlichen EE-Technologien Photovoltaik, Wind an Land und Wind auf See.

Abbildung 6-34 zeigt die gesamten Kraftwerkskapazitäten (in GW) entsprechend dem kostenoptimalen Ausbau der Kapazitäten in den vier Szenarien. Der maximal berechnete Ausbau der Windkraftanlagen auf See im Jahr 2045 unterscheidet sich weder innerhalb der Zielerreichungsszenarien noch zwischen REF und DEL, H2 und PtX. Windkraft auf See muss bei geringerer THG-Ambition im REF-Szenario in HSH und MVP erst später oder gar nicht ausgebaut werden. In den Szenarien DEL, H2 und PtX werden die technischen Potenziale dagegen bereits 2040 fast vollständig ausgebaut.

Windkraftanlagen an Land werden in allen drei Zielerreichungsszenarien bereits 2030 fast vollständig ausgebaut. Die einzige Ausnahme ist hier der Knoten BBS (Berlin, Brandenburg, Sachsen-Anhalt), für den der Ausbau optimalerweise 2040 gemäß den Kapazitäten des Netzentwicklungsplans abgeschlossen ist (im REF-Szenario erst 2045).

Im Jahr 2040 werden die technischen EE-Ausbaupotenziale weitgehend ausgeschöpft, sodass das Stromsystem dort bereits ganzjährig die Nachfrage decken können muss. Darüberhinausgehende Bedarfe im Jahr 2045 müssen dann durch Importe von Strom aus benachbarten Ländern und Kraftstoffen aus Übersee gedeckt werden.

Auch die PV-Anlagen müssen spätestens 2045 weitgehend ausgebaut sein, mit leichten Unterschieden je nach THG-Ambition. Hier zeigt sich, dass der PV-Ausbau vor allem in den süd- und mitteldeutschen Bundesländern (BAW, BAY, NRW, SRH und THS) im kostenoptimierten System früher als in den anderen Regionen Deutschlands erfolgt (allerdings nicht so früh wie Windkraftanlagen an Land). Dies ist auf die tendenziell höheren Produktionsmengen von PV im Süden und Windkraft an Land im Norden zurückzuführen.

#### 6.8.3.5 **Der kostenoptimale Ausbau von Elektrolyseuren und Anlagen zur Herstellung von strombasierten Kraftstoffen in Deutschland**

Die regionalen Verteilungen der systemoptimalen Produktionskapazitäten von Wasserstoff und strombasierten Kohlenwasserstoffen in den neun Modellknoten in Deutschland sind in Abbildung 6-35 dargestellt.



Bis auf Baden-Württemberg (BAW) und Thüringen-Sachsen (THS) gibt es zwischen den Jahren 2040 und 2045 keinen wesentlichen Zubau mehr. In H<sub>2</sub>-Szenario gibt es demgegenüber etwas geringere Elektrolyseleistungen in BAY, BAW und SRH.

Die installierten Kapazitäten zur Herstellung von synthetischem Methan schwanken stark zwischen den Szenarien, was sich auch in der großen Spannweite der in Deutschland bereitgestellten Menge synthetischen Methans von ca. 20 bis 400 TWh/a zeigt. Die unterschiedlichen Nachfragen nach Methan und Wasserstoff stammen aus den drei unterschiedlichen Nachfrageszenarien und sind damit größtenteils eine exogene Vorgabe für das REMix Modell. Allerdings bestehen auch starke lokale Unterschiede. Die Anlagenleistung im REF-Szenario ist vernachlässigbar, weil dort auch 2045 noch fossiles Methan importiert wird, das Residualemissionen verursacht. Die installierten Leistungen im DEL-Szenario weisen einen Sprung zwischen 2030 und 2040 auf, sind aber regional relativ gleich verteilt. Das zeigt, dass die Anlagen in diesem Szenario vorwiegend nachfragegetrieben installiert werden, um eine effiziente Auskopplung von Wärme aus KWK-Anlagen in Fernwärmenetze zu realisieren, was in allen Modellknoten vorkommt.

Die Szenarien H<sub>2</sub> und PtX weisen eine ähnliche räumliche Verteilung der Anlagen zur Herstellung synthetischen Methans auf, aber in unterschiedlicher Höhe. Die Modellknoten BBS, BNS, HSH, SRH und THS zeigen den charakteristischen Sprung in der Kapazität in der Dekade 2030 bis 2040, danach wird nicht mehr zugebaut. Der Sprung ist im Szenario H<sub>2</sub> in den Knoten BBS und BNS höher. Die vier Knoten BAW, BAY, MVP und NRW zeichnen sich durch einen starken Zubau der Produktionskapazitäten für synthetisches Methan aus. Dieser Zubau führt aber im Szenario PtX zu einer fast zweifach höheren installierten Leistung als im Szenario H<sub>2</sub>. In diesen Knoten wird für die Herstellung synthetischen Methans, im Gegensatz zu den anderen Modellknoten, auch importierter Wasserstoff eingesetzt (in MVP bspw. ca. 50 TWh im Vergleich zu 30 TWh in Deutschland produzierten Wasserstoffs).

Die installierte Produktionskapazität an Fischer-Tropsch-Synthesereaktoren und Raffineriekapazitäten in den Szenarien beträgt im Mittel etwa 10 GW (REF: 14 GW, DEL: 12 GW, H<sub>2</sub>: 8 GW, PtX: 11 GW). Durch das Erlauben von Residualemissionen im REF-Szenario steht in 2045 noch viel günstige erneuerbare Primärenergie (Windkraft und PV) in Deutschland zur Verfügung, sodass die Importquoten der flüssigen strombasierten Kraftstoffe am geringsten sind. Die Anlagen werden im Szenario REF vor allem nach 2040 zugebaut, mit Ausnahme von SRH (wegen der hohen Bedarfe nach strombasiertem Kerosin am Flughafen Frankfurt/Main), BNS und HSH (wegen hoher Windpotenziale). An diesen drei Knoten werden erste Kapazitäten bereits vor 2030 ausgebaut.

Die drei anderen Szenarien DEL, H<sub>2</sub> und PtX weisen den größten Ausbau von FT-Anlagen in BBS und SRH auf. Die Ausbaudynamiken unterscheiden sich relativ stark in den Szenarien. Während es im DEL-Szenario nur in SRH bereits 2030 zum Ausbau von FT-Anlagen kommt, werden diese im H<sub>2</sub>-Szenario in der gleichen Dekade auch schon in BNS und HSH und im PtX-Szenario in allen Knoten, außer MVP, auf jeweils ca. 1 GW pro Modellknoten ausgebaut. Wie bereits bei der Methanisierung sind vor allem die Bedarfe an strombasiertem Diesel und Benzin für den privaten Straßenverkehr die Treiber, die in fast allen Knoten ähnlich bestehen. In der darauffolgenden Dekade bis 2040 werden Kapazitäten dann zusätzlich dort ausgebaut, wo EE-Strom verfügbar ist.

An den Beispielknoten Mecklenburg-Vorpommern, Baden-Württemberg und Bayern lässt sich nachvollziehen, dass Modellknoten entweder vermehrt Kapazitäten zur Herstellung synthetischen Methans oder zur Herstellung von flüssigen, strombasierten Kraftstoffen aufbauen, und die jeweils anderen Energieträger importieren.

#### **6.8.4 Auswirkungen von biogenen Kraftstoffen auf die Strombereitstellung**

In BENOPT [Millinger et al. 2022] werden zehn Energiepflanzen und 13 Gruppen von Reststoffen modelliert. Die jeweilige Nutzung verschiedener biogener Ströme ist eine endogene Entscheidung im Modell, die auf der Nachfrage nach Kraftstoff, Wärme oder Strom beruht. In Deutschland wird Weizen als die am meisten verbreitete Anbaupflanze betrachtet; daher werden die Bereitstellungskosten anderer Energiepflanzen so berechnet, dass ihre Gewinnspannen mit der Gewinnspanne von Weizen als Benchmark vergleichbar sind. Die Bereitstellungskosten von Energiepflanzen setzen sich aus Direktkosten, Arbeitskosten, Brennstoffkosten, Maschinenkosten (fix und variabel) und Dienstleistungskosten zusammen, die bis 2050 mit einer Rate von 4% /a steigen. Die verfügbare Anbaufläche für Energiepflanzen wird für das Jahr 2020 mit 2,399 Mio. ha angenommen, die sich aufgrund der Flächenkonkurrenz zwischen den verschiedenen Sektoren bis 2050 leicht auf 2,159 Mio. ha verringern wird.

Zudem werden Ströme von Reststoffbiomasse aus einer Teilmenge von 77 Reststoffen berücksichtigt. Für das Jahr 2020 wird angenommen, dass die potenziellen Reststoffe dem Mittelwert entsprechen, der 2015 für energetische Zwecke verwendet wurde. Wir gehen davon aus, dass im Jahr 2050 33 % des mobilisierbaren Potenzials für den Transportsektor zur Verfügung stehen werden. Die Preise für Biomassereststoffe werden in Spannen angegeben, wie sie in Tabelle 6-6 dargestellt sind. Wie dort ersichtlich ist, ist der Mindestpreis für Altholz negativ, da die Erzeuger die Verbraucher für die Nutzung dieses Abfallstoffs bezahlen müssen. Das in jedem Jahr verfügbare Biomassepotenzial wird in drei gleich große Kategorien mit unterschiedlichen Preisen (aus dieser Spanne) aufgeteilt, um verschiedene Qualitäten ähnlicher Rohstoffe zu unterscheiden. Darüber hinaus erlauben wir den Import von Energiepflanzen, Reststoffen und synthetischen Brennstoffen mit höheren Kosten aus anderen Ländern, um den Verbrauch inländischer Ressourcen gegenüber ausländischen zu bevorzugen und die negativen Auswirkungen der Energiekopplung abzumildern.

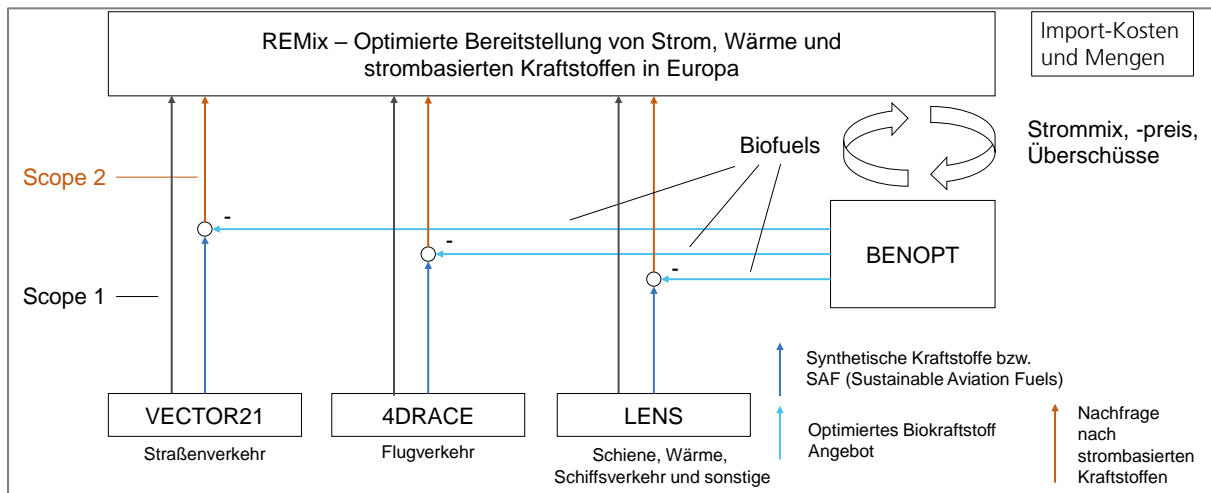
**Tabelle 6-6:** Biomasse-Reststoffpotenziale und Preise

	Reststoffpotenzial in PJ			Reststoffpreis in €/GJ	
	2020	2030	2050	Minimum	Maximum
<b>Stammholz</b>	150	150	150	11	16.8
<b>Plaudikultur</b>	0	23	166	0	2.7
<b>Stroh</b>	20	29.6	49	12.8	16.9
<b>Gülle</b>	26	33.4	48	0	0
<b>Forstliche Rückstände</b>	126	134.2	151	4.2	7.3
<b>Industrielle Holzabfälle</b>	21	21.7	23	3	3.4
<b>Gebrauchtes Speiseöl</b>	0	1.3	4	16	16
<b>Bio-Altöl aus Haushalten</b>	13	13.7	15	0	0
<b>Industrielles Altöl</b>	20	21.4	24	0	0
<b>Schwarzlaugenöl</b>	16	16	16	0	0
<b>Altholz</b>	120	120.8	122	-0.6	2.7
<b>Klärschlamm-Öl</b>	5	5	5	0	0

#### 6.8.4.1 Ergebnisse der gekoppelten REMix-BENOPT Analyse

Im Folgenden wird das Potenzial biogener Kraftstoffe aus Reststoffbiomassen und nachhaltigem Anbau analysiert, die Stromnachfrage in Deutschland zu reduzieren. Die Nachfrage nach strombasierten Kraftstoffen in Deutschland (für Endenergiebedarfe und im Fall von Gasen zur Bereitstellung saisonaler Speichermöglichkeiten) könnte ab 2040 einen besonders hohen Anteil an der Gesamtnachfrage haben (vgl. graublau Fläche in Abbildung 6-32). In Abbildung 6-36 ist das methodische Vorgehen dargestellt.

Während die vorangegangenen Analysen von den Scope 1-REMmix-Modellergebnissen ausgehen, werden im Folgenden Ergebnisse des Scope 2-Modells betrachtet. Dazu werden exogene Nachfragen nach synthetischen Kraftstoffen, gemäß einer optimalen Ressourcenallokation aus dem Modell BENOPT, um das Angebot von biogenen Kraftstoffen reduziert, in REMmix gehen dann ausschließlich Bedarfe für strombasierte Kraftstoffe ein. Weil BENOPT im Modell wiederum REMmix-Ergebnisse (Strommix, Strompreis, Überschussstrom) als Input benötigt, werden die Outputs der beiden Modelle iterativ übergeben, bis eine Konvergenz beider Modellergebnisse erreicht wird (weitere Details siehe [Esmaeili Aliabadi et al. 2022]). Bei der Darstellung der Ergebnisse werden quantitative Angaben wegen der hohen Unsicherheiten meistens auf 10 TWh gerundet.



**Abbildung 6-36:** Details der Modellkopplung REMix-BENOPT inkl. der drei Modelle VECTOR21, 4DRACE und LENS.

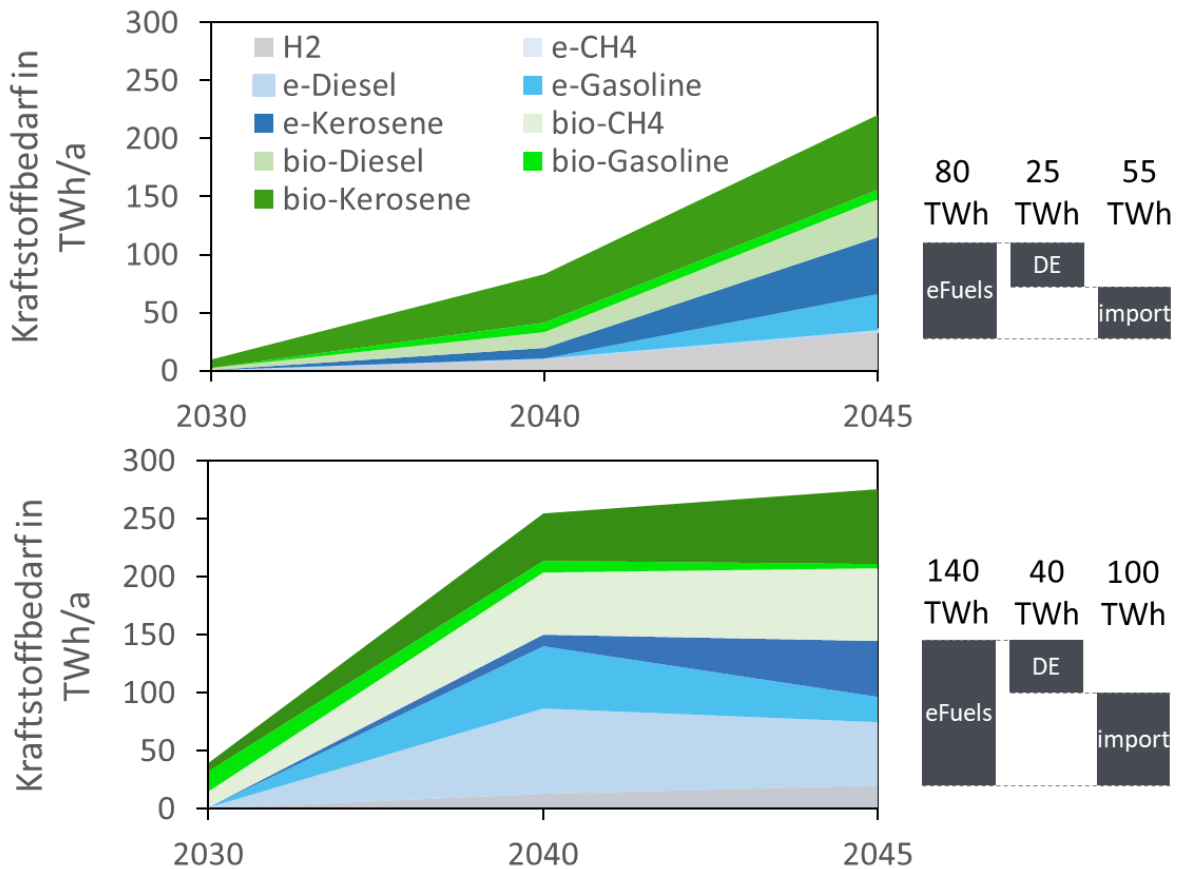
In Scope 1 wird die Endenergienachfrage ausschließlich über importierte und in Deutschland erzeugte, strombasierte Kraftstoffe gedeckt. Scope 2 berücksichtigt eine Reduktion der durch Strom zu deckenden Endenergienachfrage aufgrund der Nutzung von Kraftstoffen aus biogenen Quellen. Die Pfadabhängigkeiten des optimalen Stromsystemdesigns und -betriebs auf der einen und der optimalen Ressourcenallokation auf der anderen Seite, werden durch Modelliterationen im gekoppelten System endogen berücksichtigt.

Bezogen auf die Endenergienachfrage des Verkehrssektors werden im Referenz-Szenario in 2045 etwa 30 TWh Wasserstoff im Pkw- und Lkw-Bereich, ca. 40 TWh synthetisches Benzin im Pkw-Bereich, 30 TWh synthetischer Diesel (20 TWh Pkw und Lkw, 10 TWh Schiffs- und Schienenverkehr) und 110 TWh synthetisches Kerosin benötigt. Überschlägig lassen sich die Nachfragen nach etwa 180 TWh flüssigen Kraftstoff in etwa 280 TWh Wasserstoff (etwa 380 TWh Stromäquivalent) ohne Berücksichtigung von Produktstromzusammensetzungen von Fischer-Tropsch-Anlagen, umrechnen. Für das PtX-Szenario summieren sich die Bedarfe mit 70 TWh synthetischem Diesel, 30 TWh synthetischem Ottokraftstoff und 110 TWh Kerosin auf 210 TWh, für die ca. 330 TWh Wasserstoff (bzw. ca. 440 TWh Stromäquivalente) benötigt werden.

Diese Strommengen entsprechen in etwa den heutigen Endenergieverbräuchen von Industrie und Haushalten für Strom, was die Herausforderung deutlich macht. Daher wird im Folgenden die mögliche Rolle von Kraftstoffen aus biogenen Quellen (Reststoffbiomasse und nachhaltiger Anbau) untersucht. Durch deren Einsatz kann sich die Menge an strombasierten Kraftstoffen signifikant verringern, die entweder durch eine Herstellung in Deutschland oder den Import aus anderen Weltregionen gedeckt werden muss. Die Betrachtung wird nur für die beiden Szenarien REF und PtX durchgeführt, weil im letzteren die Strombedarfe für die H<sub>2</sub>-Herstellung am größten sind.

Abbildung 6-37 stellt die Entwicklung der deutschen Kraftstoffbedarfe für den Transportsektor als Ergebnis des gekoppelten Modellsystems dar. In Grün sind die Anteile dargestellt, die durch Biodiesel, Bioethanol und Biokerosin gedeckt werden könnten. In Blau sind die verbleibenden Bedarfe nach strombasiertem Diesel, Ottokraftstoff und Kerosin angegeben. Fossile

Kraftstoffe sind nicht dargestellt, werden aber insbesondere für die Beimischungsquoten von Bioethanol angenommen.



**Abbildung 6-37:** Die Entwicklung des Kraftstoffbedarfs und möglicher Aufteilungen in biogene und direktelektrische Quellen in Deutschland in den Szenarien REF (oben) und PtX (unten). Für Annahmen zu den biogenen Quellen (siehe Tabelle 6-6). Auf der rechten Seite der Grafik sind für die verbleibenden Nachfragen nach nicht-biogenen, synthetischen Kraftstoffen außerdem die jeweils kostenminimale Herstellung in Deutschland sowie der Import nach Deutschland über alle flüssigen Kraftstoffe summiert angegeben.

Im REF-Szenario stellt synthetisches Kerosin den Großteil der Nachfrage dar, in geringeren Volumina wird synthetischer Diesel im Fracht- und Schiffsverkehr eingesetzt. In der darauffolgenden Dekade erhöht sich die Nachfrage von unter 100 TWh auf etwas über 200 TWh. Mit Abstand den größten Anteil der Nachfrage nimmt mit 110 TWh Kerosin ein, gefolgt von Diesel (40 TWh), Ottokraftstoff und Wasserstoff (beide jeweils etwa 30 TWh). Mehr als die Hälfte der Kraftstoffnachfrage wird im REF-Szenario biogen gedeckt, es verbleiben ca. 50 TWh strombasiertes Kerosin und 30 TWh strombasierter Ottokraftstoff.

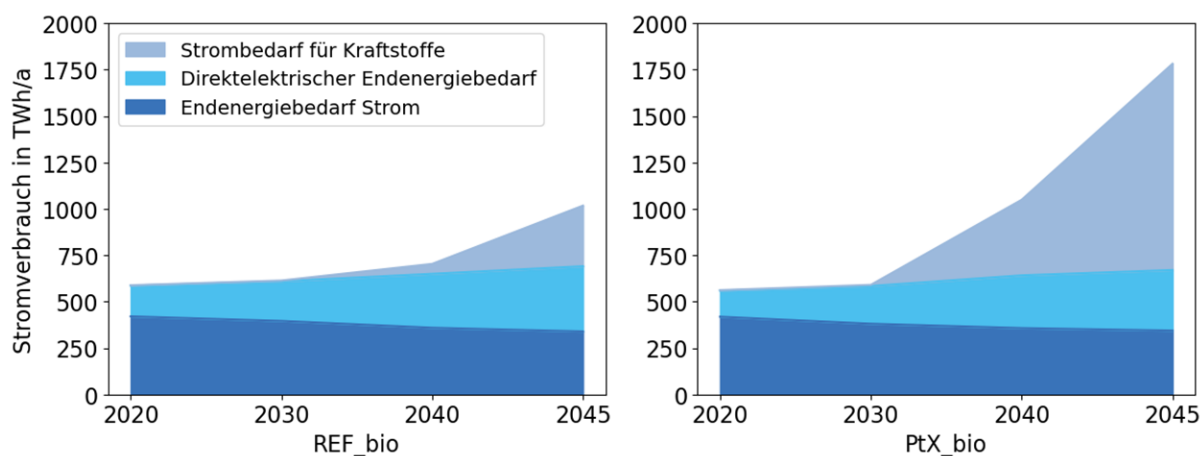
Im PtX-Szenario ist dagegen die Dynamik des sprunghaften Anstiegs der Nachfrage nach synthetischen Kraftstoffen zwischen 2030 und 2040 deutlich zu erkennen. Insbesondere 2040 wird die Nachfrage nach synthetischem Kerosin biogen gedeckt, Ottokraftstoff wird weitestgehend strombasiert und Diesel zu ca. einem Drittel biogen und zu zwei Dritteln strombasiert



bereitgestellt. Im Jahr 2045 wird ca. die Hälfte der Kraftstoffnachfrage biogen gedeckt, hauptsächlich Kerosin und Diesel. Die Begrenzung der Nachfrage nach biogenem Ottokraftstoff ist durch technische Restriktionen bedingt, die eine Beimischung von Bioethanol zu Ottokraftstoffen auf 5 % limitieren. Eine weitergehende Verwendung von technisch möglichen Flex Fuel Vehicles wurde hier nicht betrachtet, weil es als unwahrscheinlich gilt, dass OEMs entsprechende Modelle auf dem deutschen Markt (wieder) verfügbar machen. Bei Dieselmotoren können höhere Mengen biogener Kraftstoffe beigemischt werden, da hier die Mengenbeschränkungen für Diesel weniger strikt gehandhabt wurden, insbesondere für Lkw.

Die vorangegangenen Beschreibungen zeigen, dass biogene Kraftstoffe ein großes Potenzial haben, den erheblichen Strombedarf durch strombasierte Kraftstoffe von 380 bis 440 TWh Strom auf 170 bis 260 TWh Strom zu reduzieren. In beiden betrachteten Szenarien werden etwa 30 % der nachgefragten Kraftstoffe in Deutschland hergestellt, insbesondere Kerosin und Diesel werden importiert.

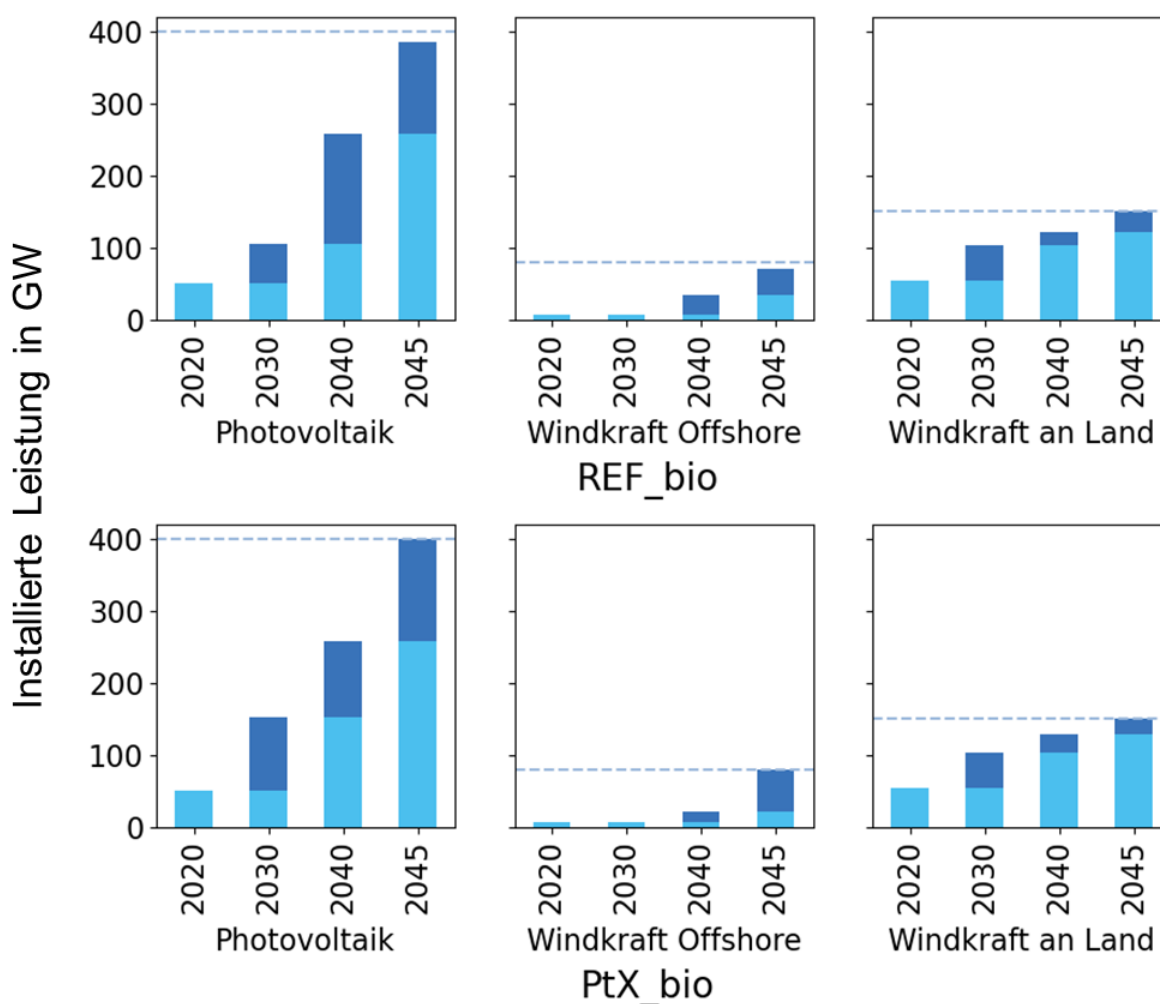
Die Auswirkungen dieser starken Reduktion auf die Entwicklung der deutschen Stromnachfrage ist in Abbildung 6-38 für die Szenarien REF und PtX dargestellt. Während die Stromnachfrage ohne den Biokraftstoff-Einsatz in den Zielerreichungsszenarien im Jahr 2040 infolge der Kraftstoffnachfrage auf 1.500 bis 1.750 TWh steigt (vgl. Abbildung 6-32), wird diese in den beiden Szenarien auf 700 bis 1.000 TWh reduziert. Bis zum Jahr 2045 steigt die Nachfrage dennoch auf ein vergleichbares Niveau, ohne Berücksichtigung von biogenen Quellen.



**Abbildung 6-38:** Entwicklung der Stromnachfrage nach Abzug biogener Kraftstoffe für die Szenarien REF und PtX, differenziert nach klassischer Endenergienachfrage, Strombedarf für neue direktelektrifizierte Anwendungen und Strombedarfe für die Erzeugung gasförmiger und flüssiger, synthetischer Energieträger.

Direktelektrische Anwendungen umfassen batterieelektrische Fahrzeuge, Plug-In-Hybride, Industrie- und Gebäude-Wärmepumpen, elektrische Boiler für Gebäude und Industrie sowie Verluste durch Batterie- und Pumpspeicher. Der Strombedarf für Kraftstoffe ergibt sich aus dem Strombedarf für alkalische und PEM-Elektrolyseure, Direct-Air-Capture-Anlagen sowie in geringem Umfang für die Synthesenanlagen (Raffinerien). Der Strombedarf für die Kompression von Gasen für Speicherung und Verteilung wird dem Strombedarf für Kraftstoffe zugeordnet.

In Abbildung 6-39 ist der kostenoptimale Zubau an Kapazitäten zur Stromproduktion aus erneuerbaren Energien in den vier Zieljahren für die beiden Szenarien REF und PtX dargestellt. Der kostenoptimale Ausbau im REF-Szenario ist vergleichbar mit dem ohne Berücksichtigung biogener Quellen. Die reduzierte Stromnachfrage wirkt sich vor allem in einem geringeren und späteren Ausbau der teuren Windkraft auf See aus, für die im REF-Szenario ohne biogene Quellen im Jahr 2040 große Teile des Potenzials ausgebaut werden. Durch die Reduktion der Stromnachfrage wird diese später (2045) und nicht vollständig ausgebaut.



**Abbildung 6-39:** Kostenoptimaler Zubau an Photovoltaik sowie Windkraftanlagen an Land und auf See, aggregiert in Deutschland, in GW installierte Nennleistung für die Szenarien REF und PtX unter Berücksichtigung des Biokraftstoffeinsatzes. Die gestrichelten Linien markieren den angenommenen Zubau im Netzentwicklungsplan, der hier als Maximum angesetzt wird. In Hellblau sind jeweils die aus den Vorjahren zugebauten Kapazitäten angegeben, die zu Beginn der Optimierung verfügbar sind. In Dunkelblau wird der Zubau im jeweiligen Jahr angegeben.

Die Unterschiede durch den Einsatz von Biokraftstoffen sind im PtX-Szenario deutlicher. Wie im REF-Szenario muss die Windkraft auf See zum Großteil erst 2045 ausgebaut werden, hier allerdings fast vollständig. Während die Potenziale für Windkraftanlagen an Land bereits 2030

und Photovoltaik 2040 ohne Biokraftstoffe fast vollständig ausgebaut werden müssen, erfolgt der Ausbau hier weniger sprunghaft; bis 2030 wird vor allem Windkraft an Land ausgebaut, der PV-Ausbau ist signifikant (von 50 auf 150 GW). 2040 wird Windkraft an Land dann in geringerem Umfang ausgebaut, Photovoltaik ungefähr in gleichem Umfang wie in der vorangegangenen Dekade. Für die THG-Neutralität 2045 müssen die Potenziale Erneuerbarer Energien auch unter Berücksichtigung von Biokraftstoffen vollständig ausgenutzt werden, was für Windkraft an Land bereits 2040 weitgehend abgeschlossen sein muss. Für Photovoltaik muss sich der Ausbau zwischen 2040 und 2045 dann noch einmal auf knapp 100 GW beschleunigen.

## 6.9 Industrieökonomische und gesamtwirtschaftliche Auswirkung

Die Energiesystemtransformation ist mit tiefgreifenden technologischen Veränderungen verknüpft, die weit über den bisher betrachteten Kontext der Energie- und Verkehrssysteme hinaus ihre ökonomische Wirkung entfalten können [Lehr et al. 2012; Lutz et al. 2021]. Beispielsweise ist bei der Einführung von synthetischen Kraftstoffen zu berücksichtigen, dass diese nicht nur andere Treibstoffe im Verkehr ersetzen, sondern auch die Produktion der Fahrzeugindustrien, die Produktion der Kraftstoffhersteller, die Produzenten der Infrastruktur, den Bedarf an Strom aus erneuerbaren Energien und die Zahl entsprechender Erzeugungsanlagen beeinflussen werden. All diese Aspekte spielen in der gesamtwirtschaftlichen Betrachtung eine Rolle und werden nach Möglichkeit berücksichtigt, um die dahinterstehenden Zusammenhänge zu quantifizieren und deren Größenordnungen bezogen auf die deutsche Volkswirtschaft, sichtbar zu machen. Die beschriebenen Auswirkungen werden deshalb im Rahmen einer Analyse mit dem makroökonomischen Modell PANTA RHEI untersucht, wobei insbesondere auf die Differenzen zwischen den vier BEniVer-Szenarien (REF, DEL, PtX und H2) eingegangen werden soll.

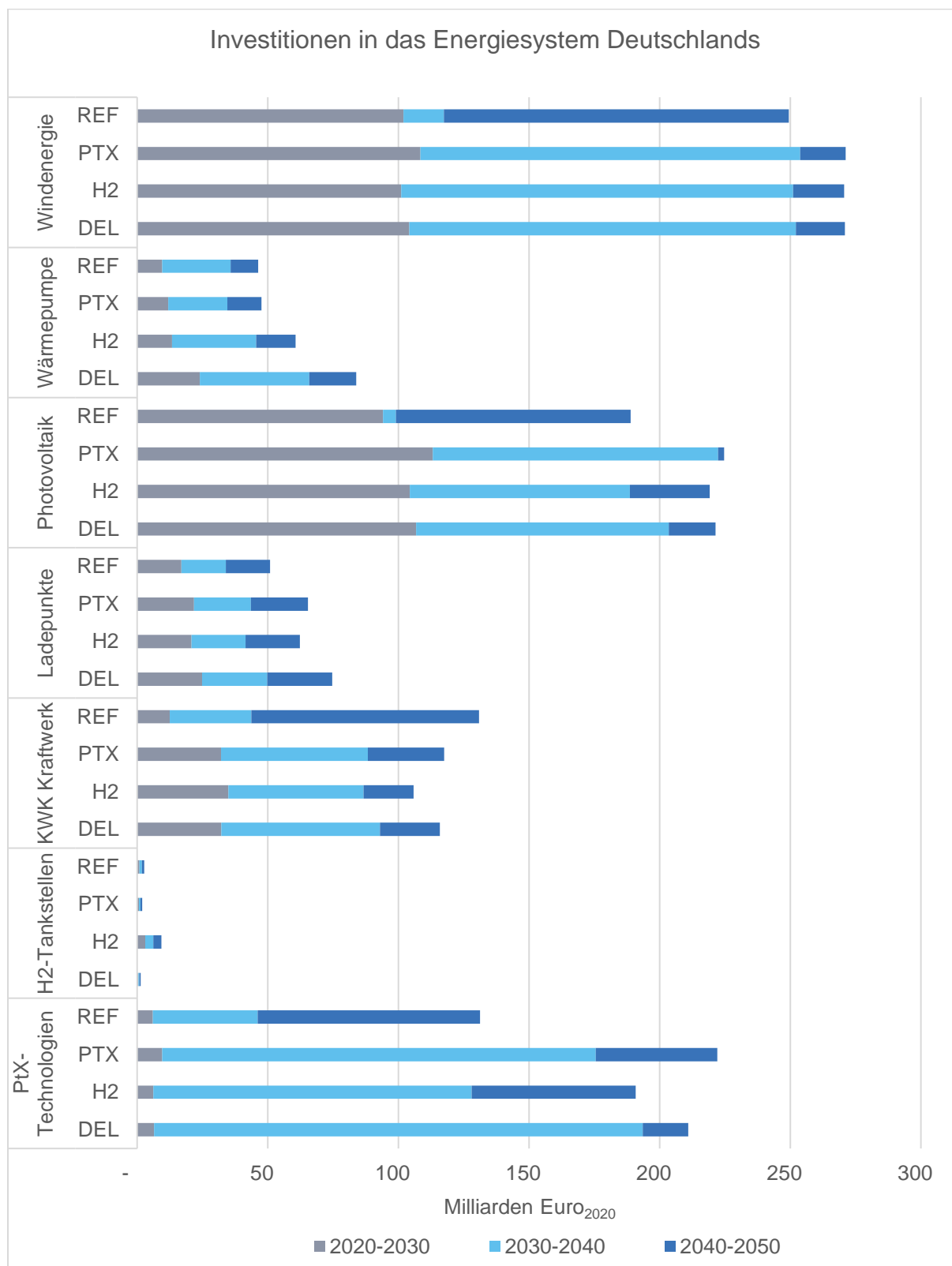
Dazu werden alle makroökonomisch relevanten Rahmendaten, und insbesondere die szenario-spezifischen Investitionen aus der Energiesystemanalyse und den Verkehrsmodellen, extrahiert und als Input für PANTA RHEI aufbereitet. Zusätzliche Arbeiten sind nötig bei der Erstellung von spezifischen Input-Output-Vektoren für alle Fahrzeugvarianten und den zur Herstellung von synthetischen Kraftstoffen benötigten Technologien. Weiterhin werden Außenhandelszenarien benötigt, welche die Höhe der möglichen Ex- und Importe Deutschlands für die relevanten Technologien und Fahrzeuge vorgeben. Die Entwicklung dieser Außenhandelszenarien basiert auf verschiedenen Einflussfaktoren, wie dem Marktvolumen in den Exportländern sowie der Wettbewerbsposition der deutschen Unternehmen im internationalen Vergleich, aber auch länderspezifische Außenhandelsbeziehungen, ebenso wie die Marktnähe, spielen bei dieser Fragestellung eine Rolle.

### 6.9.1 Investitionen in das deutsche Energiesystem

Als zentrale Eingangsdaten für PANTA RHEI dienen die durch das Energiesystemmodell REMix berechneten, szenariospezifischen Investitionszeitreihen (vgl. Kapitel 6.8).

In Abbildung 6-40 sind die wesentlichen Investitionen (ca. 90 % der Gesamtinvestitionen) dargestellt. Es wird deutlich, dass in allen Szenarien ein Großteil in die Technologien der Energieerzeugung (Wind- und Solarenergie) und die molekülbasierte Energiespeicherung mittels PtX-Technologien (Elektrolyseure und Syntheseanlagen) fließt.

Die Ergebnisse zeigen außerdem, dass Investitionen, die im REF-Szenario erst im Zeitraum 2040-2050 getätigt würden, in den anderen Szenarien vorgezogen werden, um die kurzfristigen Klimaziele zu erreichen. Die Investitionssummen über alle Dekaden hinweg unterscheiden sich zwischen den Szenarien nur wenig, was einen ersten Hinweis darauf gibt, dass auch die makroökonomischen Auswirkungen der verschiedenen Szenarien nahe beieinander liegen könnten.



**Abbildung 6-40:** Investitionen in das Energiesystem Deutschlands für ausgewählte Technologien in Milliarden Euro

### **6.9.2 Außenhandelsszenarien**

Neben den Investitionen, welche direkt innerhalb Deutschlands getätigt werden, sind Exporte von wesentlicher Bedeutung für die zukünftige wirtschaftliche Aktivität. Deshalb werden im Rahmen von BEniVer Außenhandelsszenarien entworfen, um die zukünftigen Ex- und Importe Deutschlands adequat zu berücksichtigen. Als für die Energiesystemtransformation relevante Exportprodukte wurden dabei der Fahrzeugsektor und die Energietechnologien (Windenergie, Solarenergie, Synthesetechnologien, Elektrolyseure und Gasturbinen) ausgewählt. Alle weiteren Exporte werden im Modell konstant gehalten.

#### **Internationaler Handel mit Fahrzeugen**

Zur Identifikation der Entwicklung deutscher Fahrzeugexporte und resultierender Umsatzanteile im Pkw- und Lkw-Bereich werden Außenhandelsszenarien auf Basis der VECTOR21-Fahrzeugszenarien entwickelt und bis 2050 fortgeschrieben. Die Fortschreibung basiert auf unterschiedlichen Rahmenbedingungen und Annahmen, die auf Basis bestehender Literatur und Experteneinschätzungen identifiziert und definiert wurden. Diese umfassen je Fahrzeugsegment und Antriebskonzept u. a.:

- Anteil der deutschen Produktion an der internationalen Nachfrage
- Entwicklung der Inlandsproduktion
- Entwicklung der Exportquote
- Entwicklung der Produktionsanteile je Antriebsart

Für den Pkw-Bereich werden diese Annahmen folgendermaßen hinterlegt:

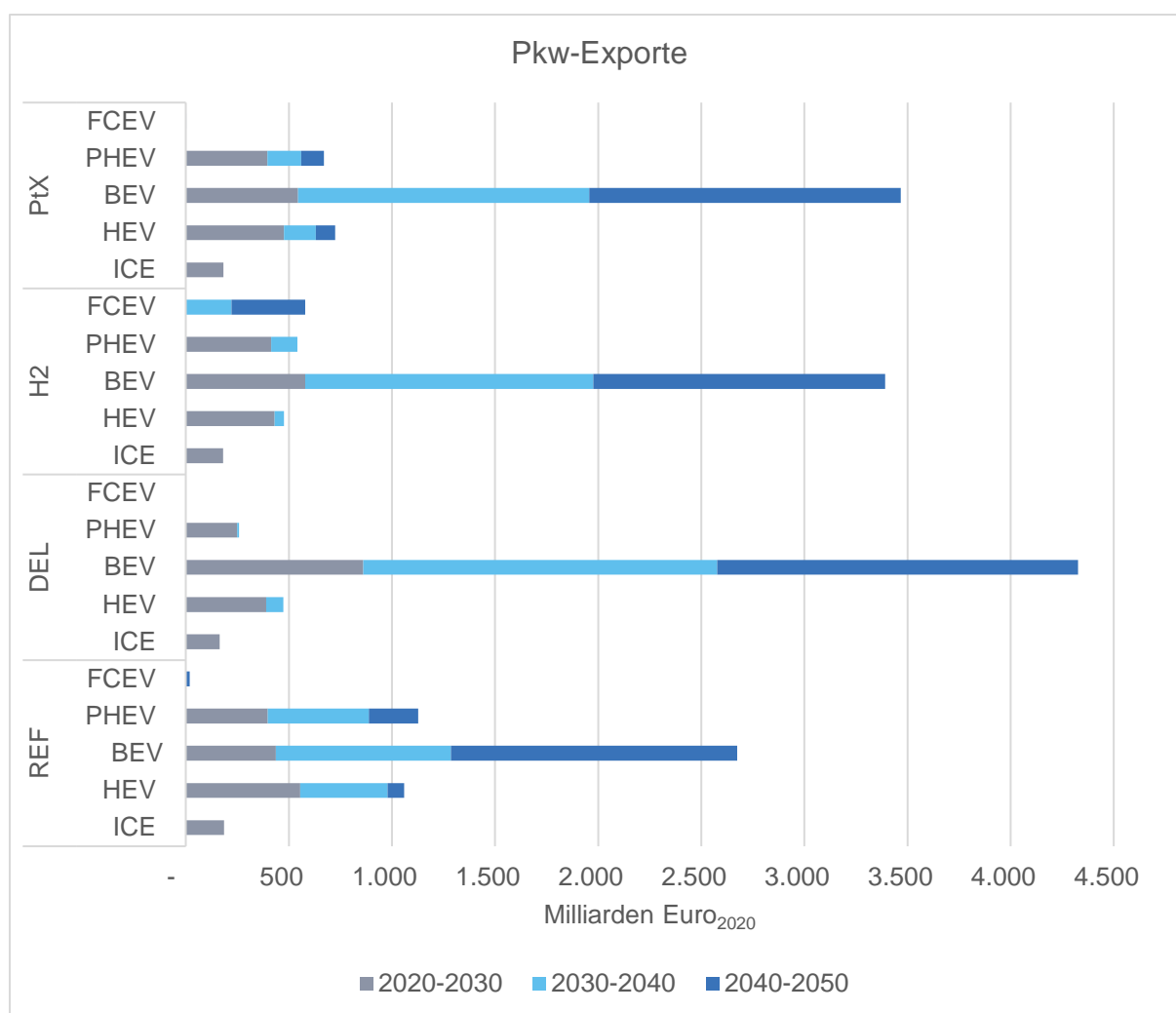
- Anteil der deutschen Pkw-Produktion an der internationalen Nachfrage: 5,0–5,5 % pro Jahr; in allen 4 Pkw-Außenhandelsszenarien konstant
- Entwicklung der Inlandsproduktion: Steigerung von 3,11 Mio. Fahrzeugen bis 2027 auf ca. 5 Mio. Fahrzeuge (2030: 5,8 Mio; ab dann 0,5% Wachstum p.a. auf 6,4 Mio. bis 2050); in allen 4 Szenarien konstant
- Entwicklung der Exportquote: Steigerung von ca. 77 % auf 78 % in 2030; ab dann 1 % Wachstum p.a. auf 89 % in 2050; in allen 4 Szenarien konstant
- Entwicklung der Produktionsanteile je Antriebskonzept: Auf Basis der 4 VECTOR21-Pkw-Neuzulassungsszenarien (vgl. Kap. 6.4)
- Berechnung der Exportwerte je Antriebskonzept auf Basis jährlicher Umsätze

Für den Lkw-Bereich sind diese Annahmen wie folgt:

- Anteil der deutschen Lkw-Produktion an der internationalen Nachfrage: 3,5 % pro Jahr; in allen 4 Lkw-Außenhandelsszenarien konstant
- Entwicklung der Inlandsproduktion: Steigerung von 0,14 Mio. Fahrzeugen bis 2027 auf ca. 0,20 Mio. Fahrzeuge (ab dann 0,5 % Wachstum p.a. auf 0,22 Mio. bis 2050); in allen 4 Szenarien konstant
- Entwicklung der Exportquote: Steigerung von ca. 73 % in 2022 auf ca. 76 % in 2030; ab dann 0,5 % Wachstum p.a. auf 84 % in 2050; in allen 4 Szenarien konstant;

- Entwicklung der Produktionsanteile je Antriebskonzept: Auf Basis der 4 VECTOR21-Lkw-Neuzulassungsszenarien (vgl. Kap. 6.4)
- Berechnung der Exportwerte je Antriebskonzept auf Basis jährlicher Umsätze

Die kumulierten Exportwerte bei Pkw und Lkw in Milliarden Euro im Zeitraum 2020 bis 2050 je Antriebskonzept und Szenario sind in Abbildung 6-41 und Abbildung 6-42 dargestellt. Dabei entfallen mit durchschnittlich 5.120 Milliarden Euro etwa 92 % der kumulierten Fahrzeugexporte auf den Pkw-Bereich.

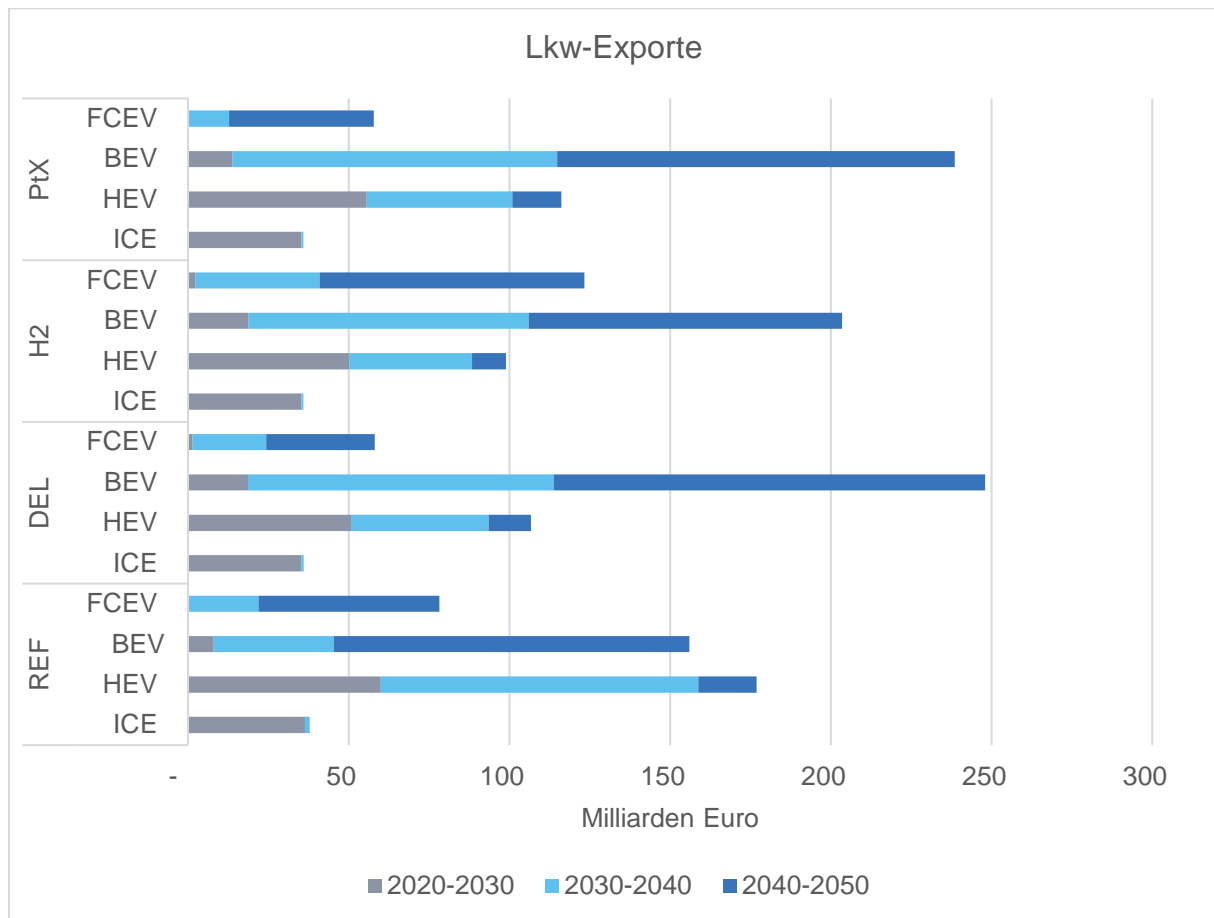


**Abbildung 6-41:** Pkw-Exporte nach Antriebsart in allen Szenarien in Milliarden Euro<sub>2020</sub>

Da sich die Außenhandelsszenarien für Fahrzeuge an den Zulassungsszenarien für Deutschland orientieren, dominieren auch bei den Pkw-Exporten die batterieelektrischen Fahrzeuge (BEV). Dabei verteilt sich ein Großteil der BEV-Exporte auf die Jahre ab 2030 während die Antriebsarten mit Verbrennungsmotor (PHEV, HEV und ICE) hauptsächlich in den Jahren bis 2030 exportiert werden. Im H2-Szenario werden in einem vergleichsweise geringen Umfang auch Wasserstofffahrzeuge exportiert (579 Milliarden Euro bis 2050).

Für die Lkw-Exporte ergibt sich in Analogie zu den szenariospezifischen Zulassungszahlen innerhalb Deutschlands eine gleichmäßigere Verteilung auf die verschiedenen Antriebsarten.

Allerdings sind auch hier die batterieelektrischen Fahrzeuge in allen Szenarien, außer dem REF-Szenario, die dominant exportierte Antriebsart.



**Abbildung 6-42:** Lkw-Exporte nach Antriebsart in allen Szenarien in Milliarden Euro

Die kumulierten Lkw-Exportvolumen liegen deutlich unter den Pkw-Exportvolumen und haben dadurch einen signifikant geringeren Anteil an der deutschen Wirtschaftsentwicklung.

### Internationaler Handel mit Energietechnologien

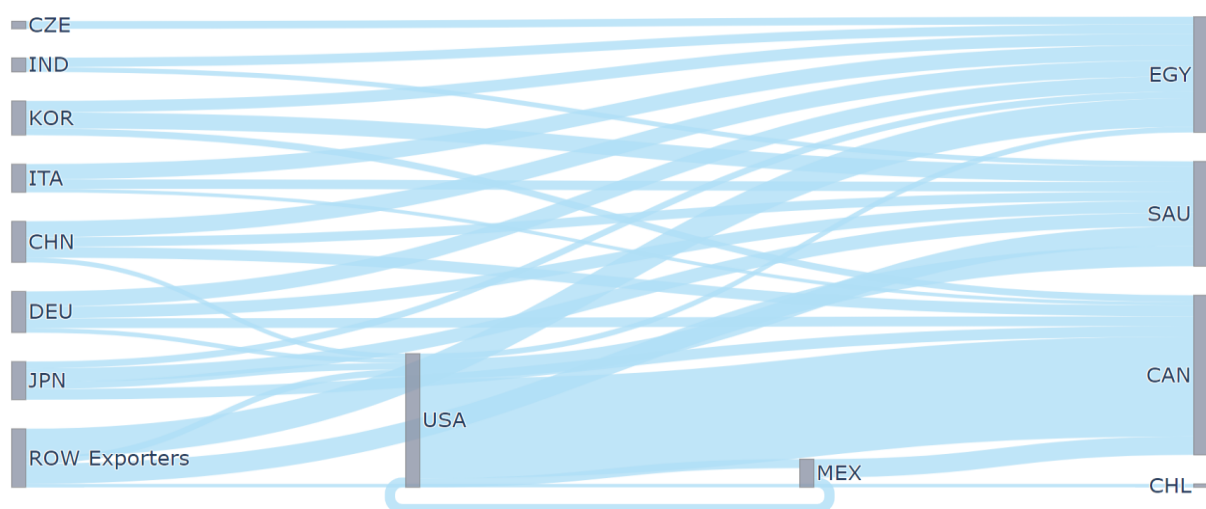
Im Gegensatz zum globalen Fahrzeugmarkt, ist der Markt für Energietechnologien zum heutigen Zeitpunkt noch vergleichsweise schwach ausgebildet. Das gilt für Elektrolyseure und Synthesetechnologien, aber auch für Wind- und Solarenergietechnologie sowie „H<sub>2</sub>-ready“-Gas-turbinen. Bei einer Umsetzung des Pariser Klimaabkommens wird sich der globale Bedarf für diese Technologien vervielfachen. Deshalb sind aktuelle Exportsummen und Marktanteile wenig aussagekräftig über zukünftige Außenhandelsbilanzen. Aus diesem Grund wird für die Erstellung der Außenhandelsszenarien von Energietechnologien der folgende alternative Ansatz gewählt:

Aus den Investitionen, die laut des 1,5 °C-Szenarios des Global Energy and Climate Outlook 2021 (GECO 2021) nötig sind, um die globalen Klimaziele zu erreichen, wird ein globaler Markt für Energietechnologien modelliert. Dazu werden die installierten Leistungen pro Technologie



und pro Land erfasst. In der GECO 2021-Modellierung wurden einige Ländergruppen zu Regionen zusammengefasst. Für diese wird der Investitionsbedarf anhand der Energienachfrageverteilung wieder länderweise aufgeschlüsselt. Anhand der aus den GECO 2021-Szenarien ermittelten Importquoten des jeweiligen Technologiesektors wird von den nötigen Investitionen auf einen potenziellen Importbedarf geschlossen. Die dann länderweise vorliegenden Importbedarfe werden auf die Technologieexporteure auf Grundlage der empirischen Außenhandelsverflechtungen (2015-2020) verteilt. Dieses Vorgehen wird für die etablierteren Technologien Windenergie, Solarenergie und Gasturbinen durchgeführt.

Um den globalen Markt von Elektrolyseuren und Synthesetechnologien abzubilden, wird auf die Ergebnisse des Verbundprojekts MENA-Fuels zurückgegriffen. Die in diesem Projekt durchgeführten Arbeiten zur Modellierung eines globalen PtX-Marktes bauen ebenfalls auf den Nachfrageszenarien des GECO 2021 auf. Die installierten Leistungen werden allerdings auf die weltweit günstigsten Erzeugungsstandorte neu verteilt. So werden im Referenz-Szenario Brennstoffmix (BM-REF)<sup>22</sup> große Mengen an Wasserstoff und synthetischen Kraftstoffen in Kanada, Saudi-Arabien und Ägypten produziert. Diese Länder haben dementsprechend auch einen großen Importbedarf an Synthesetechnologien. Dieser Importbedarf wird dann anhand der empirischen Außenhandelsverflechtungen auf die Exportländer verteilt. Dabei werden die entsprechenden Außenhandelsverflechtungen anhand einer Vielzahl von relevanten Produktgruppen abgeleitet. Eine ausführliche Beschreibung der Methodik ist in [Eschmann et al. 2022] dargelegt.



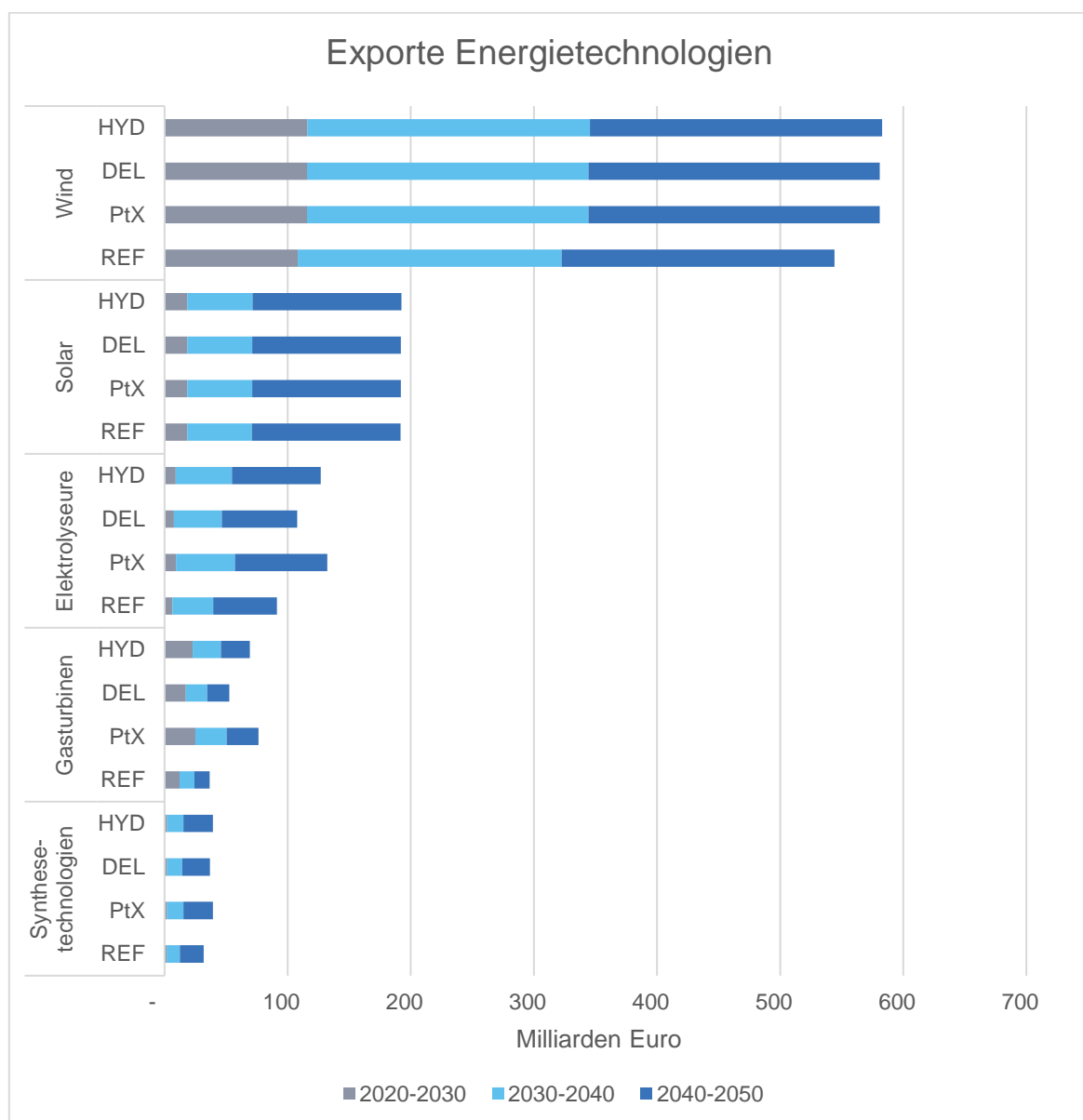
**Abbildung 6-43:** Außenhandelsverflechtungen für Synthesetechnologien im Zeitraum 2020-2070 auf Grundlage des MENA-Fuels Brennstoffmix-Szenarios (BM-REF)<sup>22</sup>. Richtung der Handelsflüsse: von links nach rechts, RoW: Rest of World

Die starke Außenhandelsbeziehung zwischen Kanada und den USA verhindert in der Modellierung eine stärkere Rolle Deutschlands. Dasselbe gilt für China und Ägypten. Saudi-Arabien

<sup>22</sup> Der Zusatz REF steht in diesem Fall für den MENA-Fuels Referenzfall des „Weighted Average Costs of Capital“ (WACC) von 6 % für alle Länder.

hat seine Technologieimporte vergleichsweise breit diversifiziert. Die Stärke der Patentanmeldungen im Bereich der synthetischen Kraftstoffe in den USA, China, Südkorea, Japan und Deutschland decken sich größtenteils mit denen in diesem Außenhandelsszenario (s. Kap. 7.1).

Aus der beschriebenen Außenhandelsmodellierung kann nun der deutsche Export von Energietechnologien extrahiert werden. Die Veränderung des Außenhandels über die verschiedenen BEniVer-Szenarien wird an die europäische Entwicklung gekoppelt, welche über die REMix-Modellierung (Kap. 6.8) bekannt ist. Dabei wird angenommen, dass sich die globale Zusammensetzung der Energietechnologien in demselben Verhältnis verändert, wie die europäische. So werden im Referenz-Szenario beispielsweise 6 % weniger Windenergieanlagen in Europa installiert als in den drei anderen Szenarien. Dadurch geht auch der Export von Windenergieanlagen aus Deutschland um 6 % zurück.



**Abbildung 6-44:** Exporte von Energietechnologien in Milliarden Euro für alle Szenarien

Die Synthesetechnologien (Methan-, Fischer-Tropsch- und Methanol-Synthese) werden in dieser Darstellung zusammengefasst. Trotz eines signifikanten Marktanteils Deutschlands bei diesen Technologien (vgl. Abbildung 6-43) ist der kumulierte Produktionswert im Vergleich zu denen der Wind-, Solar- oder Elektrolysetechnologien eher gering. Insgesamt liegen die Exporte von Energietechnologien deutlich unterhalb der Exportwerte von Fahrzeugtechnologien, was darauf schließen lässt, dass der Export von Fahrzeugtechnologien weiterhin der relevanteste deutsche Exportsektor bleiben wird.

### **6.9.3 Input-Output-Vektoren**

Um die Unterschiede der jeweiligen Szenarien adäquat im makroökonomischen Modell (PHANTA RHEI) berücksichtigen zu können, werden die verschiedenen Technologien zur Herstellung von strombasierten Kraftstoffen anhand der beschriebenen techno-ökonomischen Erkenntnisse (s. Kap. 5.2) differenziert aufbereitet. Dies erfolgt durch eine technologiespezifische Darstellung dieser Produktionsprozesse im Rahmen der Input-Output (IO)-Tabelle des statistischen Bundesamtes.

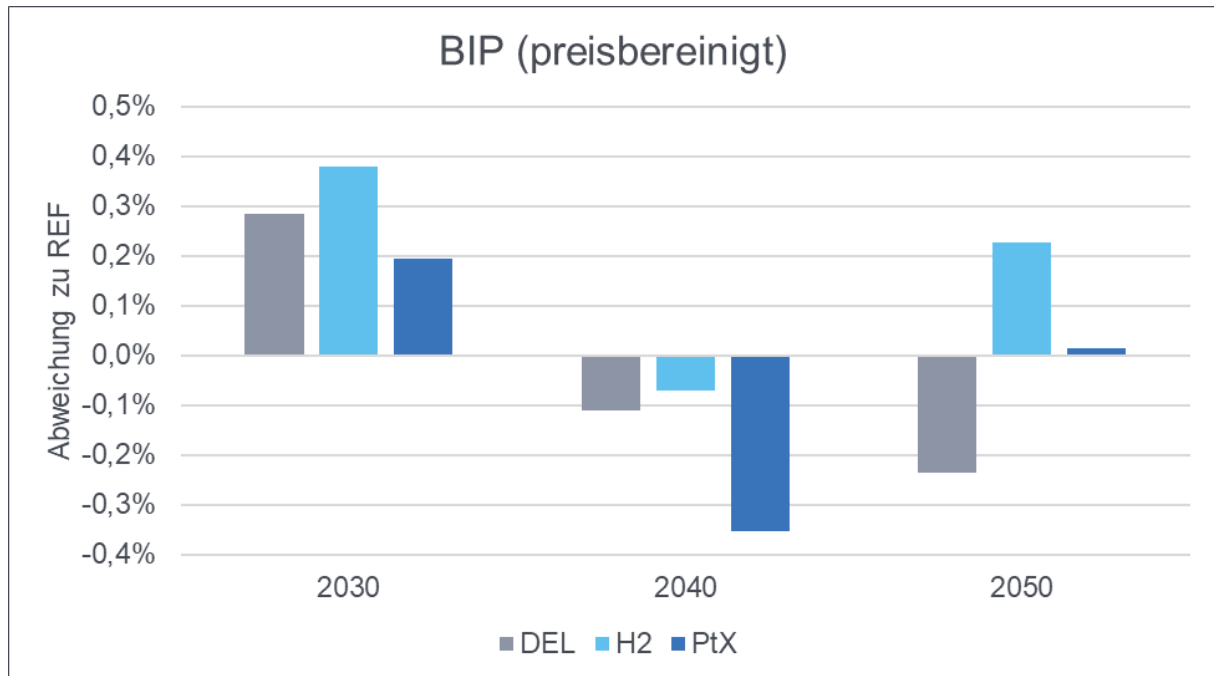
Die IO-Vektoren für die Herstellung von ICE-, HEV-, PHEV-, BEV- und H2-Fahrzeugen basieren ebenfalls auf Vektoren der IO-Tabelle 2016 für bestehende Wirtschaftszweige. Im Jahr 2016 machte die Produktion von E-Fahrzeugen in Deutschland noch keinen nennenswerten Anteil an der Gesamtproduktion der Automobilindustrie aus. Der Vektor für den Wirtschaftszweig „Kraftwagen- und Kraftwagenteile“ wird daher genutzt, um die Produktion von Verbrennungsmotoren sowie antriebsstrangfernen Fahrzeugkomponenten abzubilden. Die Herstellung von Komponenten des Antriebsstrangs von E-Fahrzeugen wird durch die Vektoren der Elektro- und Elektronikindustrie approximiert. Die zugehörigen Wirtschaftszweige der IO-Tabelle sind „Elektrische Ausrüstungen“ (für Elektromotoren, Batterien und Brennstoffzellen) und „Datenverarbeitungsgeräte, elektronische und optische Erzeugnisse“ (für Leistungselektronik und Ladegeräte). Die Gewichtung der Vektoren erfolgt auf Grundlage der in VECTOR21 ermittelten Fahrzeug- und Komponentenkosten. Für Batteriezellen, die den wichtigsten Input in der Produktion von Fahrzeugbatterien darstellen, wird unterstellt, dass diese im Jahr 2021 noch vollständig importiert werden müssen, aber ab dem Jahr 2025 vollständig in Deutschland produziert werden können.

Bezüglich der Herstellung der erneuerbaren Energieerzeugungstechnologien (Wind- und Solarenergie) werden ebenfalls technologiespezifische IO-Vektoren berücksichtigt, welche auf bereits veröffentlichte Arbeiten zurückgreifen [O'Sullivan und Edler 2020].

### **6.9.4 Ergebnisse**

Anhand eines Vergleichs der Szenarien lassen sich die Effekte der eingestellten Annahmen zu den verschiedenen möglichen Zukunftsentwicklungen ermitteln. Abbildung 6-45 zeigt die relativen Abweichungen des preisbereinigten BIP in den Szenarien DEL, H2 und PtX gegenüber dem REF-Szenario. Zunächst ergibt sich für das Jahr 2030 ein positiver Effekt in allen drei Zielszenarien, der sich auf verschiedene Wirkkanäle im Modell zurückführen lässt: Investitionen, Exporte und privater Konsum liegen auf makroökonomischer Ebene höher als im REF-Szenario.

Die Ausgaben privater Haushalte für Pkw sind im DEL-Szenario aufgrund günstigerer Batteriekosten für E-Autos zwar deutlich niedriger als im REF-Szenario, bei gleich hoher Sparquote steigen dafür die Ausgaben für andere Konsumverwendungszwecke und gleichen die geringeren Pkw-Investitionen aus. Insgesamt wirkt sich das höhere verfügbare Einkommen in den Zielszenarien positiv auf den privaten Konsum aus.



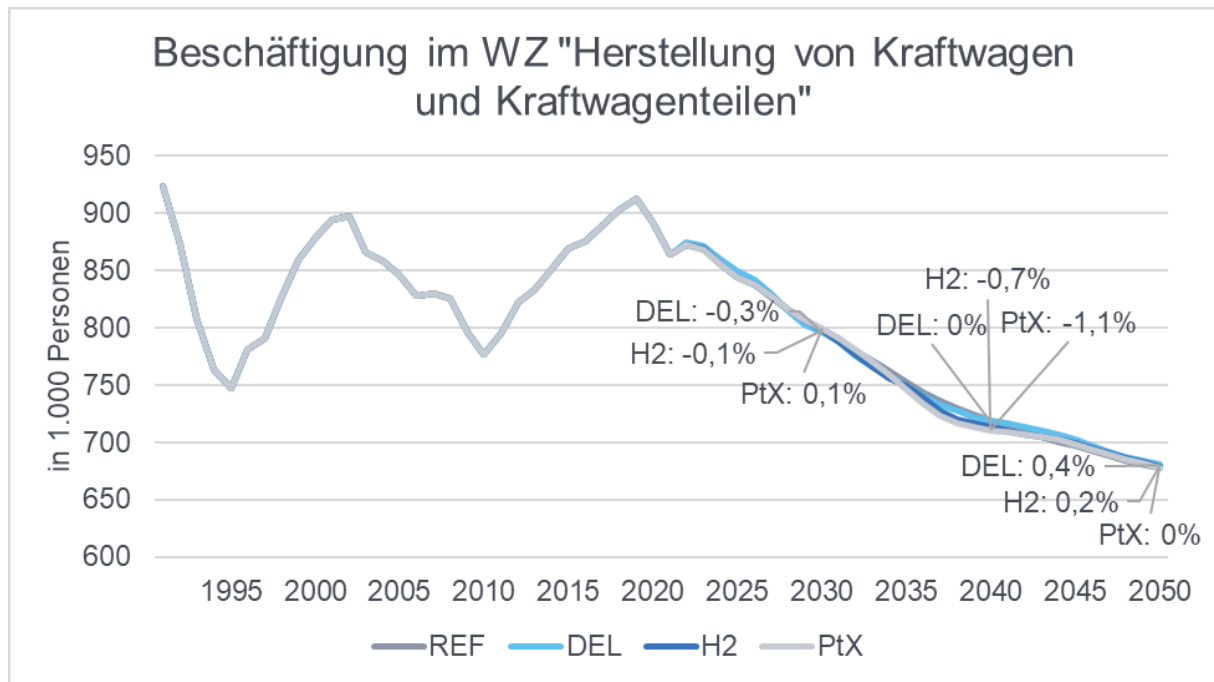
**Abbildung 6-45:** Relative Differenzen des BIP in den Zielszenarien DEL, H2 und PtX von der REF-Entwicklung

Im Jahr 2040 kehrt sich der BIP-Effekt ins Negative um. Zwar wirken sich höhere Konsumausgaben privater Haushalte sowie ein deutlicher Investitionsschub, insbesondere infolge der Investitionen in das Energiesystem, in allen Zielszenarien positiv auf das BIP aus. Dem entgegen schmälern jedoch die im Vergleich zum REF-Szenario niedrigeren Exporte und höheren Importe den Effekt: Die Exporte werden von der Ausfuhr sowohl von Fahrzeugen als auch von Energieanlagen beeinflusst, wobei die Pkw-Exporte dominieren. Im DEL-Szenario werden 2040 zwar mehr Pkw exportiert als im REF-Szenario, allerdings liegen die Exportpreise in diesem Wirtschaftszweig höher, sodass die Exporte in realen Preisen niedriger sind. Die Importe in den Zielszenarien werden im Jahr 2040 zum einen von einem höheren Bedarf an Wasserstoff und strombasierten Kraftstoffen aus dem Ausland und zum anderen von höheren Energieanlagen-Importen getrieben. Darüber hinaus hängen sie auch von der inländischen Produktion ab, die induziert durch importintensive Investitionen in Energieanlagen und Fahrzeuge höher liegt und damit mehr Importe nach sich zieht als im REF-Szenario. Bei diesen gegenläufigen Effekten von Konsum und Investitionen auf der einen und Ex- und Importen auf der anderen Seite, überwiegen im Jahr 2040 die negativen Effekte, die im PtX-Szenario aufgrund eines leicht schwächeren Konsums und einer leicht schlechteren Außenhandelsbilanz am stärksten ausfallen.

Im Jahr 2050 ist der BIP-Effekt im H2-Szenario positiv, während er im DEL-Szenario negativ bleibt. Hierfür sind vor allem deutlich niedrigere Exporte und ein nur noch leicht positiver Impuls auf den privaten Konsum ausschlaggebend. Importe und Investitionen liegen hingegen in allen Zielszenarien niedriger als im REF-Szenario, da die Inputdaten für die Energieanlagen eine ab 2041 höhere Investitionstätigkeit (vgl. Abbildung 6-40) bzw. Importaktivität im REF-Szenario vorsehen. Positive und negative Effekte auf das BIP gleichen sich 2050 im H2-Szenario weitgehend aus, sodass sich im Ergebnis nur eine marginale Abweichung zum REF-Szenario zeigt.

Insgesamt sind die Effekte in den Zielszenarien als gering zu bewerten. Zum einen lässt sich dies darauf zurückführen, dass das Referenz-Szenario, mit dem die Zielszenarien verglichen werden, keine Business-as-usual-Entwicklung abbildet, in der nur Fahrzeuge mit Verbrennungsmotor hergestellt werden. Auch im REF-Szenario wird nicht an Verbrennungsfahrzeugen festgehalten, sondern eine Energiewende im Verkehr umgesetzt, die allerdings langsamer verläuft als in den anderen Szenarien. Langfristig setzen sich Fahrzeuge mit neuen Antriebsformen durch, die ein daran angepasstes Energiesystem sowie klimaneutral produzierte Energieträger benötigen. In allen Szenarien dominieren, trotz unterschiedlicher Schwerpunkte E-Fahrzeuge den Markt. Zum anderen wird in allen untersuchten Szenarien nur ein Ausschnitt der Energiewende betrachtet. Energiewendemaßnahmen z. B. im Gebäudebereich oder der Industrie bleiben unberücksichtigt, sodass sich die damit verbundenen ökonomischen Effekte, insbesondere durch höhere Investitionen, nicht in den Ergebnissen widerspiegeln können.

Die Beschäftigung liegt in allen Zielszenarien gesamtwirtschaftlich betrachtet leicht höher als im REF-Szenario über den gesamten Projektionszeitraum, was sich insbesondere von der höheren Produktion herleiten lässt. Für einzelne Wirtschaftszweige ergeben sich jedoch aufgrund unterschiedlicher Nachfrageimpulse teilweise auch negative Effekte auf die Beschäftigung. In der Automobilindustrie führen zudem veränderte Produktionsstrukturen, die durch die szenarienspezifischen Inputvektoren im Modell abgebildet wurden, zu Abweichungen vom REF-Szenario, die in Relation zur Gesamtentwicklung der Beschäftigtenzahl in diesem Wirtschaftszweig jedoch geringe Unterschiede ausmachen (vgl. Abbildung 6-46). Vielmehr sind, neben den Annahmen zu den Exporten und der Entwicklung der Fahrzeugbestände im Inland, der allgemeine Strukturwandel und Steigerungen der Arbeitsproduktivität entscheidend für die zukünftige Beschäftigtenzahl in dieser Industrie. In Abbildung 6-46 wird deutlich, dass die jährliche Beschäftigtenzahl in den Szenarien nur wenig von der REF-Entwicklung abweicht. Dabei ist zu bedenken, dass bereits im REF-Szenario eine weitgehende Elektrifizierung der Fahrzeugneuzulassungen stattfinden wird und die Unterschiede begrenzt sind (vgl. Kapitel 6.4.1). Ab dem Jahr 2040 ist die Beschäftigung des Fahrzeugbaus im DEL-Szenario am höchsten, was sich zum einen auf eine höhere Produktion zurückführen lässt. Zum anderen liegt diesem Wirtschaftszweig im DEL-Szenario eine Produktionsstruktur zugrunde, bei der gegenüber den anderen Szenarien leicht höhere Vorleistungen aus dem Fahrzeugbau selbst benötigt werden, während die Batteriekosten etwas niedriger sind.



**Abbildung 6-46:** Entwicklung der Beschäftigung im Wirtschaftszweig (WZ) „Herstellung von Kraftwagen und Kraftwagenteilen“ und Abweichungen in den Zielszenarien DEL, H2 und PtX von der REF-Entwicklung für die Jahre 2030, 2040 und 2050

## 7 Internationale Betrachtungen

### 7.1 Internationales Technologie-Monitoring synth. Kraftstoffe

Die systematische Erfassung von Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten und -aufwendungen im internationalen Umfeld liefert die Grundlage zur Analyse von Trendentwicklungen, Technologiepotenzialen sowie Forschungsschwerpunkten im Bereich neuartiger Fahrzeugtechnologien und -kraftstoffe. Mittels des Technologie-Monitorings können so generelle und v.a. anwendungsrelevante Entwicklungsrichtungen identifiziert und Veränderungen auf Basis von Forschungs- und Entwicklungs- (F&E) bzw. Innovationsindikatoren interpretiert werden.

Die Arbeiten zielen zum einen auf die Erweiterung der methodischen Kenntnisse und des Instrumentariums im Bereich Trend- und Technologiepotenzialanalyse, zum anderen auf die Erweiterung des für diese Analyse notwendigen Datenportfolios ab. So sollen in einem ersten Schritt aus Sicht der F&E- /Innovationsanalyse besonders relevante Entwicklungen bei neuartigen und alternativen Kraftstoffen und deren Anwendungsintensität in den Verkehrsbereichen Pkw / Lkw, Schifffahrt und Luftfahrt (sog. High-Potentials) identifiziert werden.

Ergebnisse dieser Arbeiten dienen als Grundlage für die im Rahmen des Projekts BEniVer stattfindende gesamtheitliche Bewertung neuartiger Kraftstoffe aus Perspektive der anwendungsorientierten F&E-Aktivitäten in einem internationalen Vergleich.

#### **7.1.1 Patente und Publikationen als Indikatoren für F&E-Leistungen**

Bestandteil der Arbeiten einer Trendanalyse von synthetischen Kraftstoffen zur Fahrzeuganwendung ist die Identifikation und Analyse von innovationsorientierter Forschung zu neuartigen technologischen Lösungen (Forschungs- und Entwicklungsebene). Hierfür ist es notwendig, geeignete Innovationsindikatoren heranzuziehen, auf Basis derer eine vergleichende Bewertung von (monetären) Aufwendungen in F&E und deren Ertrag (F&E-Intensität) durchgeführt werden kann. Neben Ressourcenindikatoren zur Messung des F&E-Inputs sind so insbesondere Ertragsindikatoren zur Messung des F&E-Outputs im Rahmen der vorliegenden Arbeit relevant. Hierfür können im Bereich zwischen Grundlagenforschung und angewandter Forschung v.a. (ISI-)referierte wissenschaftliche Publikationen und Patentanmeldungen herangezogen werden.

Neben der Untersuchung eingesetzter Technologien auf Produktebene, kann das Technologie-Monitoring detaillierte Analysen zur Abbildung von Forschungs- und Entwicklungstätigkeiten in sehr frühen Stadien der Technologieentwicklung ermöglichen. Hierfür sind insbesondere die Methoden der Patent- und Publikationsanalyse geeignet, da sie umfangreiche bibliometrische Analysen von Indikatoren erlauben, die Aufwendungen in und Aktivitäten zu Forschung und Entwicklung in Bezug zu neuartigen technologischen Lösungen beschreiben. Weiterhin ist es über die Kombination dieser Bewertungsmethoden möglich, Aussagen zur Struktur der Forschungslandschaft sowie zu Forschungsschwerpunkten und Entwicklungstrends zu generieren. Zudem dient die Analyse dazu, führende Institutionen aus Industrie und Wissenschaft zu identifizieren, um letztlich einen internationalen Vergleich von Wettbewerbsfähigkeit und technologischer Position zu ermöglichen.

Die Patentanalyse dient als originäres Instrument der strategischen Unternehmensführung der Untersuchung wettbewerbsrelevanter Aktivitäten in definierten Technologiefeldern und zielt als Planungs- und Entscheidungshilfe auf die Entwicklung von Handlungsempfehlungen für das Technologiemanagement ab. Hierfür wird der enge Zusammenhang zwischen Investitionen im Bereich F&E als Inputfaktor und Patentanmeldungen als Outputfaktor herangezogen. Patente beinhalten per Definition Erfindungen (Inventionen), die über den aktuellen Stand der Technik hinausgehen und in zukünftigen Produkten in konkreter Anwendung (Innovation) mit wirtschaftlichem Interesse Verwendung finden können. Neben der Nutzung als strategisches Planungstool, ist die Patentanalyse ebenfalls zur Darstellung technologieorientierter Wettbewerbs- und Trendanalysen geeignet. Patentinformationen werden damit als Indikatoren technologischer Trends und Entwicklungen sowie zur Bewertung der relativen Stärke von Technologieposition und Wettbewerbsfähigkeit im Vergleich von Institutionen, Ländern und / oder Weltregionen genutzt.

Überdies kann die Analyse themenspezifisch rezensierter, wissenschaftlicher Publikationen als Indikator für F&E-Aktivität interpretiert werden. Beide Methoden werden in Kombination verwendet, um ein gesamtheitliches und objektives Bild internationaler Aktivitäten im Bereich Forschung und Entwicklung zu erhalten. Während Publikationen als Medium zur Dokumentation wissenschaftlicher Leistungen insbesondere dem Umfeld von Universitäten und Forschungsinstituten entstammen, werden Patente aufgrund des Aspekts der wirtschaftlichen Verwertung in konkreten Anwendungen eher der Industrie zugeordnet.

### **7.1.2 Patent- und Publikationsanalyse: Methodik**

Die im Rahmen dieser Arbeiten im Sinne eines Technologie-Monitorings entwickelte Methodik zur Identifikation, Einordnung und Analyse von F&E-Aktivitäten auf Basis von Patent- und Publikationsdaten wurde nach folgendem Schema definiert:

1. Identifikation und Definition von Technologiefeldern im Bereich „synthetische Kraftstoffe“ auf allgemeiner und anwendungsorientierter Ebene
2. Definition der Such- und Recherchestrategie über International Patent Classification (IPC)-Klassen und Stichworte
3. Datenerhebung in Zitations-, Abstract- und Patentdatenbanken (SCOPUS, Espacenet)
4. Strukturierung und Harmonisierung der Rohdaten und Definition relevanter bibliometrischer Indikatoren (z. B. Autor, Jahr, Institution, Titel, Abstract, Schutzrechtsanspruch, Forschungsthema)
5. Aufbau von Technologie-Datenbanken
6. Analyse der Patent(-meta-)informationen (quantitative Analyse)
7. Analyse der Patentinhalte und Zuordnung zu Forschungs- und Technologiefeldern (qualitative Analyse)

Zur Abbildung von Trendentwicklungen sowie Schwerpunkten von technologieorientierter F&E ist es notwendig, die bibliometrischen Daten der zugrunde liegenden (Meta-)Informationen referierter wissenschaftlicher Publikationen sowie angemeldeter Patente in dezidierten Datenbanken per Indikatoren zu erfassen, zu strukturieren und zu harmonisieren, um so sowohl quantitative Analysen (Anzahl Patente / Publikationen) per statistischer Auswertung als auch qualitative Analysen (Inhalte Patente / Publikationen) über Text- und Data-Mining-Funktionen



durchführen zu können. Dementsprechend wichtig ist es deshalb, bei der Definition der für das Monitoring relevanten Technologien, diese in möglichst detaillierte Einzelthemen zu überführen, um die in Patenten und Publikationen beschriebenen neuartigen technischen Lösungen so exakt wie möglich zuordnen zu können. Zu jedem definierten Einzelthema ist dann nachfolgend die Suchstrategie zu definieren und festzulegen.

Aufbauend auf den für die Analyse relevanten Themen- und Technologiefeldern, werden nachfolgend die jeweiligen Such- und Recherchestrategien in den Zitations-, Abstract und Patentdatenbanken SCOPUS (Publikationsanalyse) und Espacenet des Europäischen Patentamts (EPO, Patentanalyse) in Kombination mit IPC-Klassen (International Patent Classification) und Schlüsselworten ausgeführt. Die diesen Quellen enthaltenen (Meta-)Informationen sind Grundlage zur Strukturierung des Rohdatenbestands und werden für die weiteren Analyse-schritte aufbereitet und harmonisiert. Auf Basis der von Espacenet und SCOPUS vordefinierten Struktur zu wissenschaftlichen Publikationen und angemeldeten Patenten, werden in einem weiteren Schritt an den Themen-/ Technologiefeldern ausgerichtete Datenbankstrukturen entwickelt und mit Daten befüllt, sodass eine zielorientierte Zuordnung und Auswertung dieser Informationen möglich ist. Insgesamt können folgende Informationen verknüpft und ausgewertet werden:

- Forschungsfeld / Themenbereich
- Technologie
- Titel
- Abstract
- Keyword
- Zitation (Patente / Veröffentlichungen)
- Anmeldejahr / Publikationsjahr
- Anmeldejahr / Veröffentlichungsjahr
- Autor, Erfinder, Institution, Anmelder
- Prioritätsnummer / Publikationsnummer / Applikationsnummer
- Land / Weltregion der Anmeldung
- Land / Weltregion der Veröffentlichung
- International Patent Classification (IPC)

Die auf Basis der erstellten Datenbankstruktur eingeordneten und harmonisierten (Meta-)Informationen können dann im Hinblick auf Fragestellungen des Technologie-Monitorings ausgewertet werden.

### **7.1.3 Patentaktivitäten: Themenfelder und Auswahl von High Potentials**

Im Folgenden wird der aktuelle Stand der für diesen Meilensteinbericht relevanten Auswertungen zu synthetischen Kraftstoffen auf übergeordneter, ungerichteter Ebene sowie jeweils nachfolgend die Analysen auf Anwendungsebene mit konkretem Bezug zu bestimmten Fahrzeugen und Fahrzeugkonzepten (Pkw / Lkw, Schifffahrt, Luftfahrt) dargestellt. Zur Analyse der Patentanmeldungen auf übergeordneter Ebene wurde für den jeweiligen synthetischen Kraftstoff eine dezidierte Suchstrategie entwickelt und Patentrecherchen in der Patentdatenbank Espacenet des Europäischen Patentamts (EPO) durchgeführt. Dabei wurden jeweils insgesamt 78 IPC-(Unter-)Klassen herangezogen (z. B. C10L, C10M, C12P, F02M) und z. T. mit einer Stichwortsuche kombiniert. Die Analyse selbst wurde weltweit durchgeführt und umfasst

einen Zeitraum der Jahre 2000 bis 2020. Die Jahre 2021 und 2022 werden aus dieser und den folgenden Analysen ausgeklammert, da sich die Werte je nach zeitlichem Verzug der Patent-schriftveröffentlichung nach Anmeldung bei den Patentämtern noch ändern können und nicht final vorliegen.

Zur Identifikation der sog. High Potentials aus F&E-Perspektive werden in einem ersten Schritt jeweils die Gesamtanzahl der identifizierten und zum Schutzrecht angemeldeten Patente insgesamt dargestellt, nachfolgend dann je synthetischem Kraftstoff die Gesamtzahl der Patente mit konkretem Anwendungsbezug. Im Verhältnis der beiden Indikatoren über die Zeit, lässt sich eine Tendenz für eine ggfs. anwendungs- und damit marktnähere Technologieposition ableiten.

Anteilig (in %) und / oder über die Zeit (Gesamtzahl p.a.) soll anschließend je Kraftstoff die Patentsituation nach Weltregionen im Vergleich dargestellt und interpretiert werden. Die Analyse dieser Patentzahlen dient der Bewertung von Veränderungen in der Struktur und Bedeutung des jeweiligen Patentmarkts (im Folgenden nur „Markt“, „IP-Markt“). Im zweiten Schritt sollen dann Aussagen zur Technologie getätigt werden, indem nicht mehr betrachtet wird, auf welchem Markt die Patente, sondern von welcher Institution sie angemeldet wurden. Damit lassen sich die führenden und bei F&E-Aktivitäten aktivsten Unternehmen / Forschungseinrichtungen / Universitäten je Technologiefeld identifizieren, anhand ihres Hauptsitzes einer Weltregion zuordnen und letztlich über ein Ranking die Haupttreiber der Technologieentwicklung darstellen. Diese und die folgenden weiteren Auswertungen werden im vorliegenden Kapitel exemplarisch für den Kraftstoff Methanol umgesetzt und im weiteren Projektverlauf auf alle zusätzlichen Kraftstoffe ausgedehnt.

Zusätzlich können ergänzende Analysen durchgeführt werden, um die Anzahl der in den Weltregionen aktiven Institutionen zu vergleichen und damit als Indikator für bestehende F&E-Strukturen und -Intensitäten heranzuziehen. Zudem ist es möglich, auf Basis der entwickelten Methodik, neben einer Untersuchung der geographischen Verteilung und der Identifikation von Forschungsclustern, auch Kooperationstätigkeiten und gemeinsame Forschungs- bzw. Innovationsnetzwerke und -dynamiken zu analysieren und vergleichend darzustellen. Hierzu werden die meist verborgenen Verbindungen einzelner Institutionen oder Erfinder über Patente hinweg visualisiert.















Die für diese Analyse betrachteten Technologiefelder umfassen diejenigen synthetischen Kraftstoffe, die von den technischen Verbänden beforscht und als relevant für die Patentanalyse bewertet wurden:

- Synthetisches Benzin
- Synthetischer Diesel
- Synthetisches Kerosin
- OME
- DME
- Ammoniak
- Ethanol
- Methanol

Insgesamt konnten in o.g. Untersuchungsfeldern 18.545 Patente seit dem Jahr 2000 identifiziert werden, davon insgesamt 2.078 mit konkretem Anwendungsbezug.

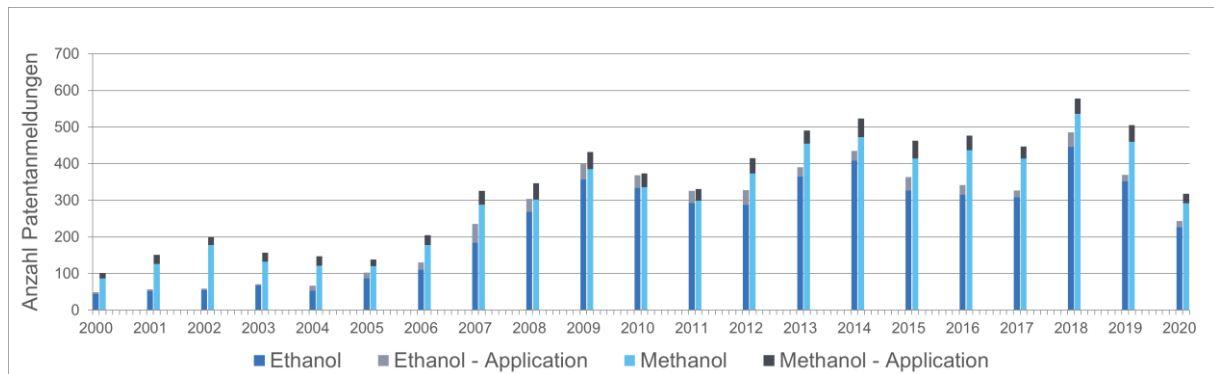
In absolutem Vergleich der reinen Patentanmeldezahlen im genannten Zeitraum ergibt sich das in folgender Tabelle 7-1 dargestellte Ergebnis, mit z.T. stark differierenden Werten für die einzelnen Kraftstoffe. Neben der Gesamtzahl angemeldeter Patente ist ebenfalls für jeden Kraftstoff dargestellt die absolute Patentzahl derjenigen Patente, die konkret mit einer Anwendung im Fahrzeug korrelieren sowie die Anwendungsintensität (Verhältnis Patentanmeldungen gesamt zu Patentanmeldungen mit Anwendungsbezug „Fahrzeug“), gemittelt über die Jahre 2000 bis 2020. Zusätzlich werden die Wachstumstrends im Vergleich der betrachteten Zeiträume (2000-2009 vs. 2010-2020) über eingefärbte Pfeile visualisiert. Dunkelblaue Pfeile bilden ein Wachstum von über 100 % im Vergleich der Zeiträume ab, hellblaue Pfeile von über 30 %, hellgraue Pfeile von unter 30 % bis hin zu einem negativen Wachstum.

**Tabelle 7-1:** Übersicht Patentanalyse für synthetische Kraftstoffe und Trendentwicklung

Kraftstoff	Patentanmeldungen gesamt	Patentanmeldungen mit Anwendungsbezug „Fahrzeug“	Anwendungsintensität (Mittelwert 2000-2020)
Methanol	7.122 	718 	11,17 %
Ethanol	5.449 	515 	10,23 %
OME / DME	2.390 	261 	11,94 %
Ammoniak	2.326 	441 	18,28 %
Synthetisches Benzin	395 	44 	11,04 %
Synthetischer Diesel	586 	79 	13,55 %
Synthetisches Kerosin	277 	20 	6,94 %

Die Analysen werden im Folgenden erläutert im Vergleich der Patentanmeldungen von:

1. Methanol und Ethanol, jeweils inkl. des Anteils und der Entwicklung direkt anwendungsbezogener Patentschriften, sowie
2. der weiteren untersuchten synthetischen Kraftstoffe Ammoniak, OME / DME, synthetischer Diesel, synthetisches Benzin sowie synthetisches Kerosin.

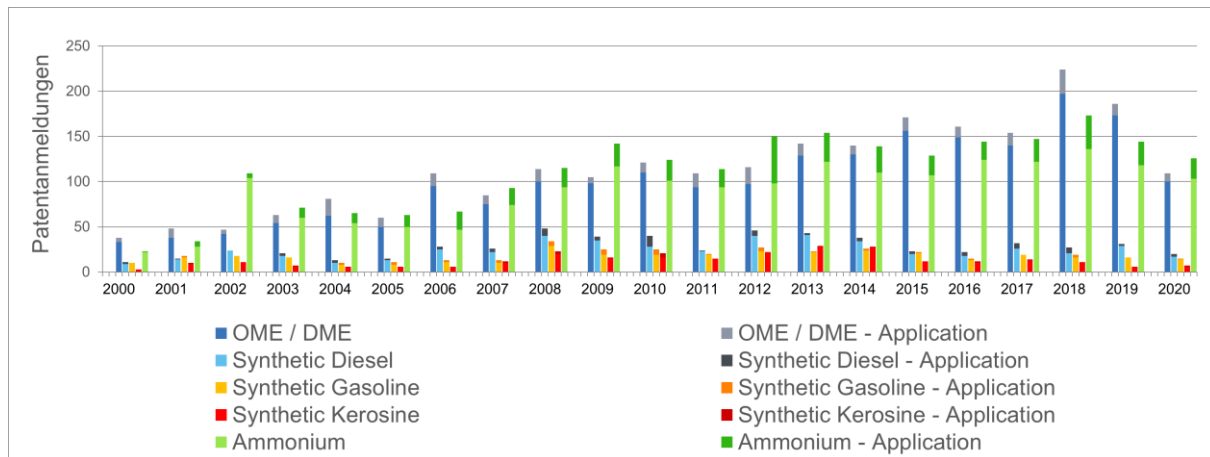


**Abbildung 7-1:** Patentanmeldungen für Ethanol und Methanol gesamt und mit Anwendungsbezug „Fahrzeug“ im Vergleich, 2000-2020

Im Zeitraum der Jahre 2000 bis 2020 konnten insgesamt 12.571 Patentanmeldungen für die Kraftstoffe Methanol und Ethanol identifiziert werden, hiervon 5.449 für Ethanol und 7.122 für Methanol, wie in Abbildung 7-1 dargestellt. Diese umfassen in der Gesamtanalyse alle diese Technologiebereiche betreffenden Inventionen und damit sowohl Grundlagen-, Anwendungs- als auch Produktions-orientierte Forschung.

Zu erkennen ist, dass die Anzahl über die Jahre insgesamt steigt, von ca. 150 auf 986 im Jahr 2018, das damit den absoluten Peak für beide Kraftstoffe darstellt. Jeweils ein Zwischenhoch ist im Jahr 2009 (826 Patente) und 2014 (949 Patente) zu erkennen. Die Gesamtzahl angemeldeter Patente sinkt ab 2018 wieder.

Die konkret anwendungsbezogenen Patente mit Bezug zu den Kraftstoffen Methanol und Ethanol betragen über den gesamten Zeitraum insgesamt 1.233. Sie konnten ebenfalls gesteigert werden, von 20 im Jahr 2000 auf 81 im Jahr 2018. Der Peak in absoluten Zahlen wurde im Jahr 2009 mit 90 Patenten erreicht, dies entspricht einem Anteil von 10,89 % an allen Patentanmeldungen in diesem Jahr. Insgesamt nimmt die Anwendungsintensität über die Jahre jedoch ab: Von 12,9 % innerhalb der ersten 10 Jahre (2000-2009) auf 8,44 % im Zeitraum 2010 bis 2020.



**Abbildung 7-2:** Patentanmeldungen für OME / DME, synthetischen Diesel, synthetisches Benzin, synthetisches Kerosin und Ammoniak gesamt und mit Anwendungsbezug „Fahrzeug“ im Vergleich, 2000-2020

Die weiteren Kraftstoffe Ammoniak, OME / DME, synthetisches Benzin, synthetischer Diesel sowie synthetisches Kerosin haben im Vergleich weniger Patentanmeldungen zu verzeichnen, wie in Abbildung 7-2 dargestellt. Für F&E-Aktivitäten im Bereich Ammoniak können insgesamt 2.326 Patentanmeldungen identifiziert werden, diese steigen von 23 im Jahr 2000 auf ein Maximum von 173 im Jahr 2018. Danach sinken sie wieder leicht ab und erreichen 126 im Jahr 2020. Auch die anwendungsbezogenen Patente bei Ammoniak steigen über die Zeit an: von einer Patentanmeldung im Jahr 2000 auf ein Maximum von 52 im Jahr 2012. Im darauffolgenden Zeitraum bis 2020 sinkt die Zahl wieder ab und erreicht einen Mittelwert von ca. 27 pro Jahr. Die Anwendungsintensität ist mit ca. 18 % bei Ammoniak, im Vergleich aller Kraftstoffe, relativ hoch.

Für den Kraftstoff OME / DME können insgesamt 2.390 Patentanmeldungen identifiziert werden (OME: 20; DME: 2.370), mit einer kontinuierlichen Steigerung im Untersuchungszeitraum: Von 38 Patentanmeldungen im Jahr 2000 auf 224 im Jahr 2018. Bis 2020 sinkt die Anzahl dann wieder auf 109 Patentanmeldungen. Die Anzahl anwendungsorientierter Patente erreicht mit 27 ebenfalls in 2018 den Höchststand und damit einen Anteil von 12 % an den gesamten Anmeldungen in diesem Jahr. Zu beachten ist jedoch, dass der Durchschnitt in den ersten 11 Jahren des Untersuchungszeitraums trotzdem höher lag (13,8 %) und danach (2011-2020) auf ca. 9,9 % absank.

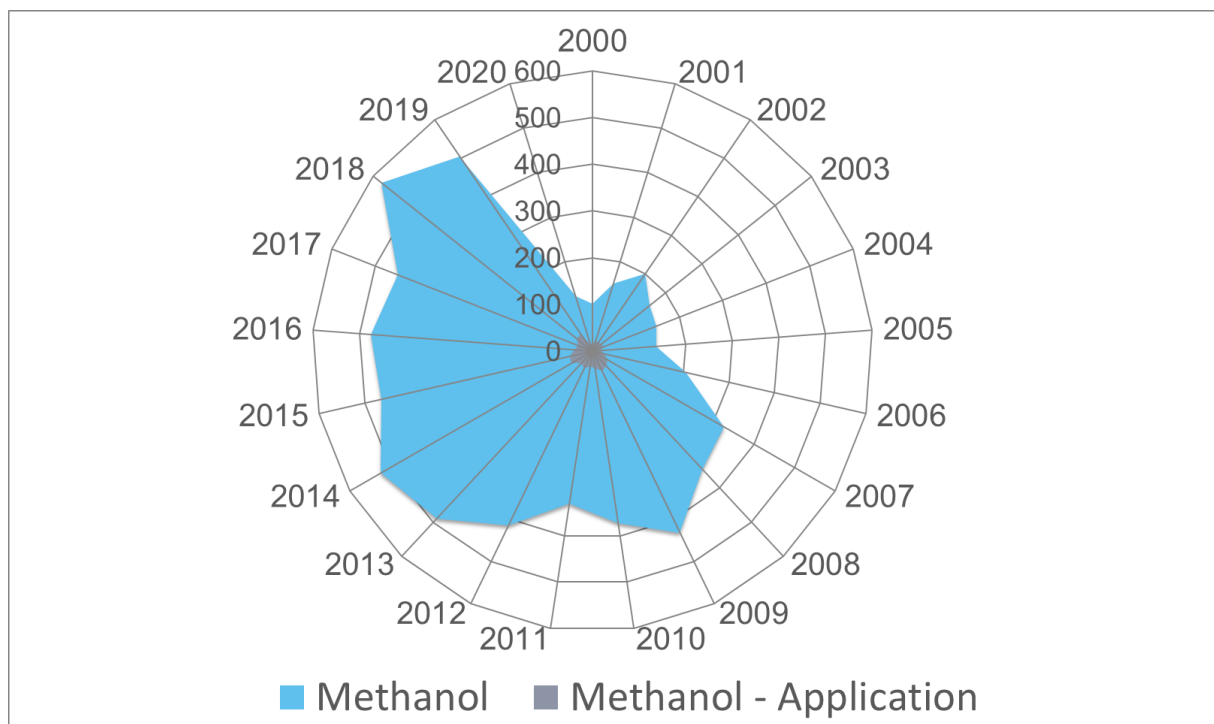
Bei den synthetischen Kraftstoffen Benzin, Diesel und Kerosin können insgesamt 1.258 Patentanmeldungen im Untersuchungszeitraum identifiziert werden, hiervon mit einem konkreten Fahrzeug-Anwendungsbezug insgesamt 143 (ca. 11,4 % Anteil). Zum Vergleich: Patentanmeldungen ohne den Zusatz „synthetisch“ für die Kraftstoffe Benzin, Diesel und Kerosin erreichen mit insgesamt 48.344 weit höhere Werte (Diesel: 33.439; Benzin: 12.801; Kerosin: 2.104).

### 7.1.3.1 Analyse der F&E-Aktivitäten: Methanol in der Fahrzeuganwendung

Dieses Kapitel beschreibt exemplarisch die Zwischenergebnisse des Monitorings von F&E-Aktivitäten am Beispiel des Kraftstoffs Methanol im Detail. Hierbei dargestellt werden:

- Trendentwicklungen und F&E-Intensitäten (Anwendungsbezug zum Fahrzeug)
- Technologieführer und Institutionen (Rankings und Patentportfolios)
- Weltregionen und Patentmärkte (Relevanz und Dynamik)

#### Trendentwicklung und F&E-Intensität



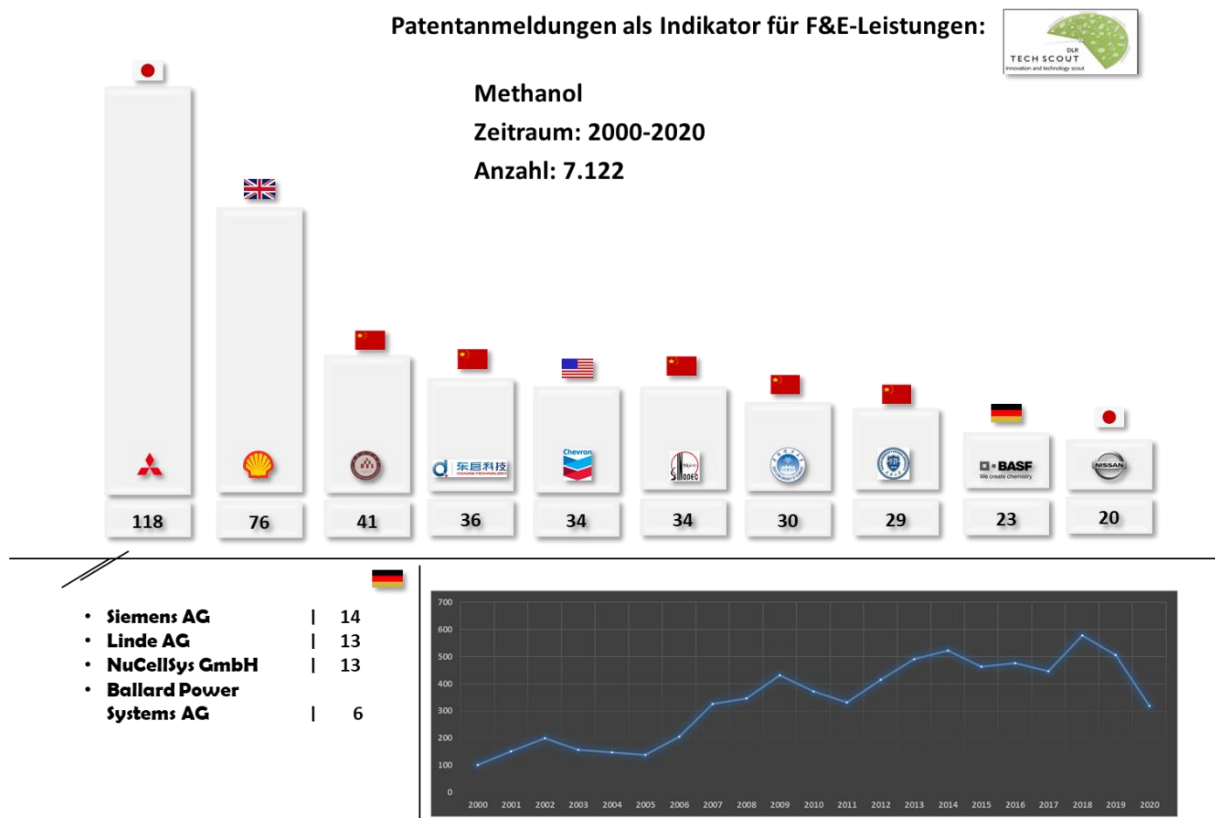
**Abbildung 7-3:** Trendentwicklung Patentanmeldungen „Methanol“ und „Methanol in der Fahrzeuganwendung“, 2000-2020

Im Zeitraum der Jahre 2000 bis 2020 konnten insgesamt 7.122 Patentanmeldungen für Methanol identifiziert werden, davon 718 mit konkretem Anwendungsbezug zum Fahrzeug.

In Abbildung 7-3 ist zu sehen, dass die Anzahl über die Jahre insgesamt steigt, von ca. 100 auf 528 im Jahr 2018, das damit den absoluten Peak darstellt.

Die konkret anwendungsbezogenen Patente mit Bezug zu Methanol konnten ebenfalls gesteigert werden, von 15 im Jahr 2000 auf 42 im Jahr 2018. Der Peak in absoluten Zahlen wurde im Jahr 2014 mit 51 Patenten erreicht, dies entspricht einem Anteil von 9,75 % an allen Patentanmeldungen in diesem Jahr. Insgesamt nimmt dieser Anteil über die Jahre jedoch ab: Von 13,4 % innerhalb der ersten 10 Jahre (2000-2009) auf 8,7 % im Zeitraum 2010 bis 2020.

## Technologieführer und Institutionen



**Abbildung 7-4:** Technologieführer im Bereich Methanol, Top 10-Ranking nach Patentanmeldungen

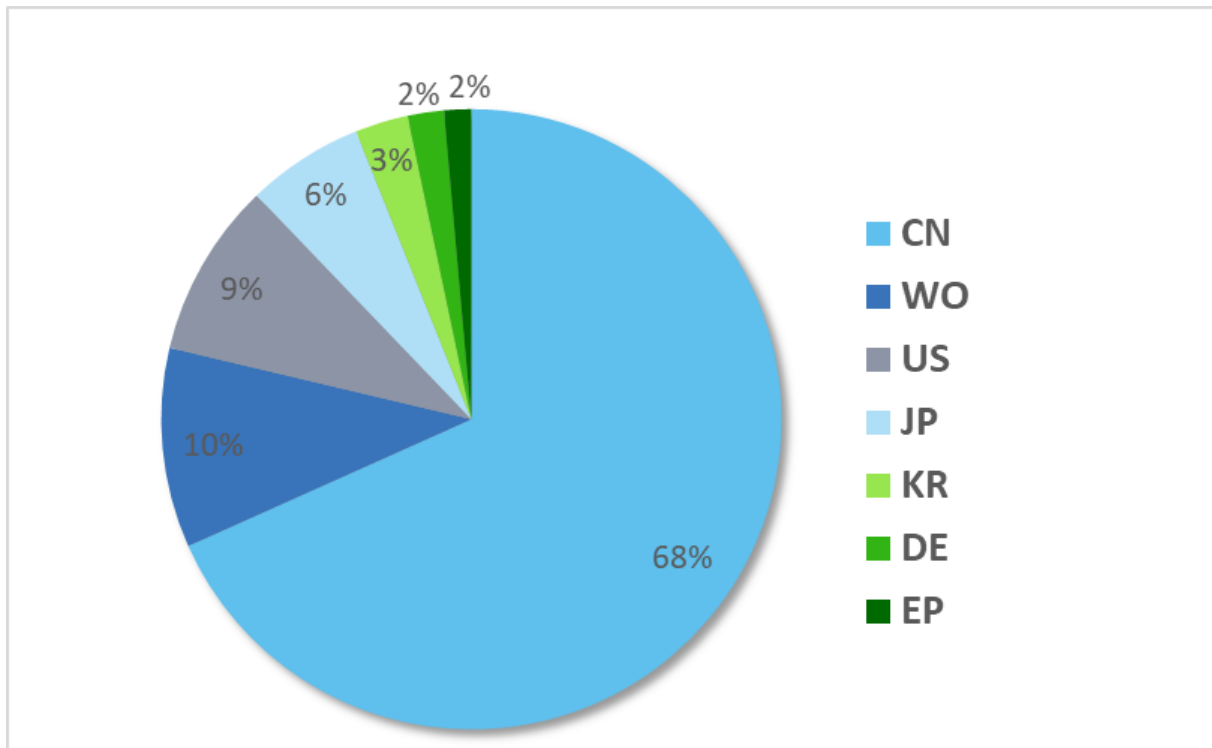
Obige Abbildung 7-4 bildet die führenden Patentanmelder auf internationaler Ebene (Top 10) sowie eine Rangliste der folgenden deutschen Unternehmen der Jahre 2000 bis 2020 ab. Insgesamt wurden in diesem Zeitraum weltweit über 7.100 Patente im Bereich Methanol angemeldet.

Die höchsten Anteile an den Patenten haben Institutionen und Firmen aus Japan, Großbritannien, China, den USA und Deutschland. Mitsubishi (inkl. Mitsubishi Heavy Industries) ist hierbei führend (Japan, 118 Patentanmeldungen), gefolgt von Shell (Großbritannien, 76) und als erste chinesische Institution die Kunming University of Science and Technology (China, 41). Vier weitere chinesische Institutionen komplettieren die Top 10, hierunter Guangxi Dongqi Energy Technology (36), China Petroleum & Chemical Corporation (34), South China University of Technology (30) und die University of Tianjin (29). Auf Rang 5 ist mit Chevron (34 Patentanmeldungen) das bestplatzierte US-amerikanische Unternehmen vertreten, bestplatziertes deutsches Unternehmen ist BASF auf Rang 9 mit 23 Patentanmeldungen. Nissan (Japan, 20) komplettiert das Ranking der Unternehmen mit den absolut meisten Patenten im Patentportfolio.

Dies zeigt, dass aktuell der chinesische Markt nicht nur für die Patentanmelder eine große Rolle spielt (wie im nächsten Abschnitt beschrieben), sondern dass dort mittlerweile auch konkrete Technologieentwicklung stattfindet, insbesondere jedoch getrieben von chinesischen Forschungseinrichtungen und Universitäten.

Unter den weiteren deutschen Unternehmen sind die Siemens AG (14), die Linde AG (13), die NuCellSys GmbH (13) sowie die Ballard Power Systems AG (6) gelistet.

### Relevanz der Patentmärkte

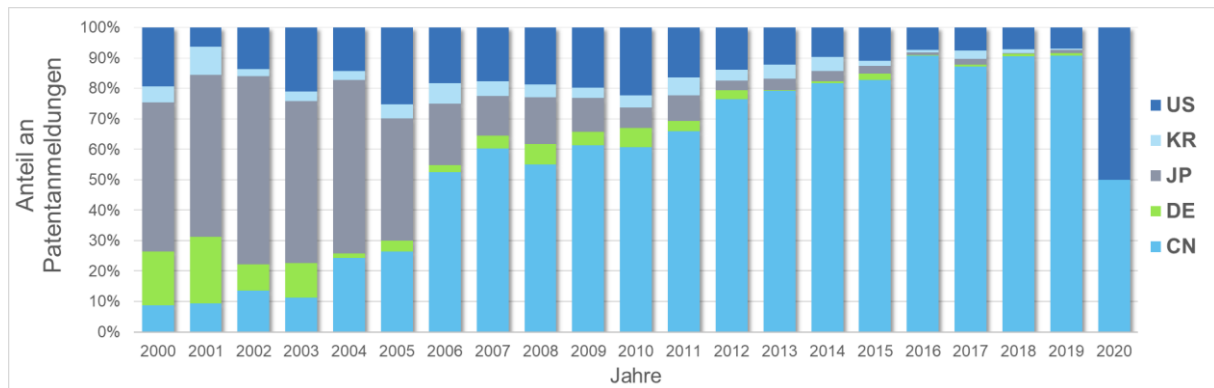


**Abbildung 7-5:** Relevanz der Patentmärkte im Bereich Methanol, Anteil geografischer Schutzrechtsansprüche

Insgesamt wurden in dem für diese Auswertung relevantem Feld Methanol über 7.100 Patente veröffentlicht, wobei die Patentmärkte China (CN), USA (US), Japan (JP), Korea (KR), Deutschland (DE), Europa (EP) und Welt (WO) zusammen ca. 94 % aller Patentschriften verzeichnen konnten (ca. 6.600), wie Abbildung 7-5 zeigt. Die überwiegende Mehrzahl der Patente in diesem Bereich von 2000 bis 2020 wurden in China angemeldet (ca. 4.800; 68 %), gefolgt von weltweit geltenden Patentschriften (ca. 780; 10 %), den USA (ca. 640; 9 %) und Japan (ca. 430; 6 %). Nur ca. 140 Patentschriften (2 %) wurden auf dem deutschen Markt für IP (Intellectual Property) publiziert, ca. 70 (2 %) mit europäischem Fokus, um dort Schutzrechtsansprüche geltend zu machen.



### Benchmark internationaler F&E-Aktivitäten



**Abbildung 7-6:** Benchmark der F&E-Anteile bei Patentanmeldungen im Bereich Methanol im internationalen Vergleich, 2000-2020

Bei Gesamtbetrachtung der F&E-Aktivitäten einer gesamten Industrie, eines Landes und / oder einer Weltregion werden Patentanmeldungen anhand der verantwortlichen Institution strukturiert und über den geografischen Hauptsitz der Institution zugeordnet. So können die Anteile an Innovationsaktivitäten über Weltregionen hinweg im Vergleich sowie deren Veränderungen bei Betrachtung über einen definierten Zeitraum, im Sinne eines Benchmarks, identifiziert werden. In der Auswertung werden die Anteile der Länder USA (US), Südkorea (KR), Japan (JP), Deutschland (DE) und China (CN) im Vergleich dargestellt. Diese sind für 6.032 der insgesamt 7.122 Patentanmeldungen verantwortlich.

Wie in Abbildung 7-6 zu sehen, ist insgesamt eine starke Verschiebung der geographischen Schwerpunkte technologischer Aktivitäten im Bereich Methanol über den Betrachtungszeitraum zu erkennen: Während die Anteile der japanischen Automobilindustrie von ca. 47 % im Jahr 2000 auf nur noch ca. 1 % in 2020 sinken, steigt der Anteil chinesischer F&E-Aktivitäten im Vergleich extrem an. Diese erreichen demnach ca. 90 % in 2018, bei einem Ausgangswert von nur ca. 7 % in 2000. In den Jahren 2019 und 2020 stabilisieren sich diese Anteile. Die Jahre 2021 und 2022 sind aufgrund von zeitlichen Verzögerungen zwischen Patenteinreichung und -veröffentlichung noch in vorläufiger Auswertung und können sich bei späterer Betrachtung ändern. Eine wissenschaftlich valide Auswertung kann deshalb nur bis 2020 erfolgen.

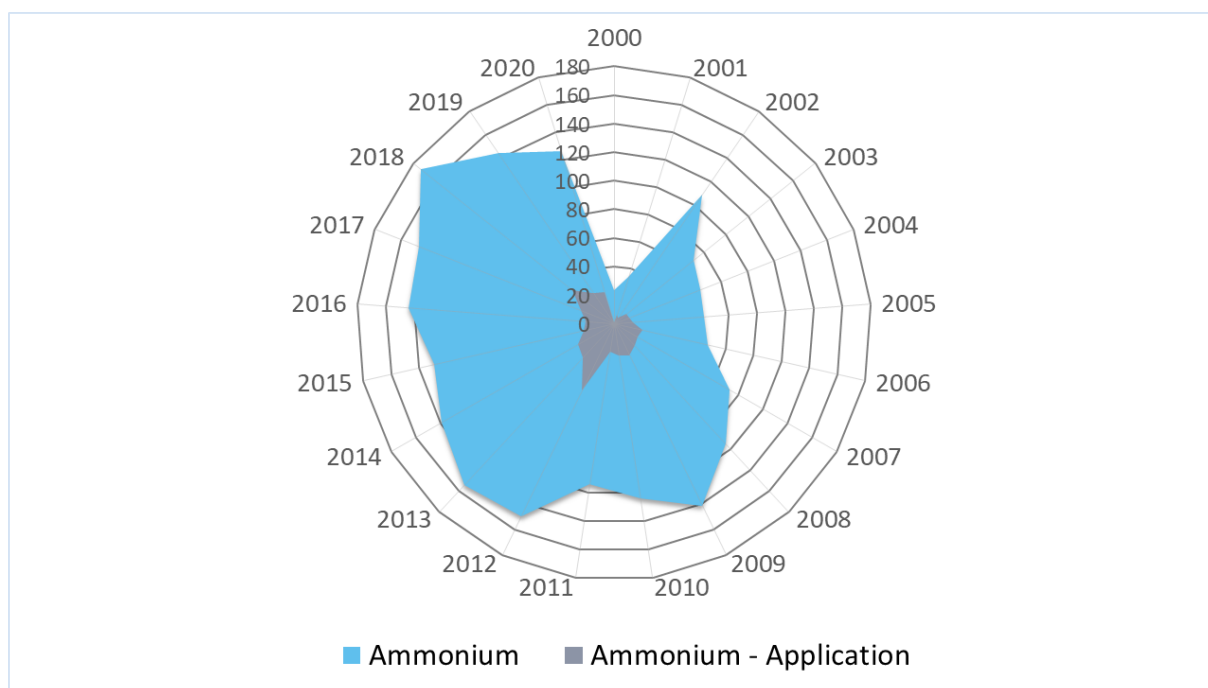
Die gesamtdeutschen Innovationsanteile konnten von ca. 17 % in 2000 auf 22 % in 2001 gesteigert werden. In den Folgejahren bis 2020 aber sinkt der Anteil dann wiederum auf ca. nur noch 1 %. Im Vergleich mit Südkorea befinden sich die Innovationsanteile ab 2004 auf einem ähnlichen Niveau (3 % in 2004, 1 % in 2020). Die USA können die F&E-Anteile über die Jahre relativ konstant zwischen 10 % und 25 % halten, mit aber ebenfalls bis 2020 abnehmender Tendenz.

### 7.1.3.2 Analyse der F&E-Aktivitäten: Ammoniak in der Fahrzeuganwendung

Dieses Kapitel beschreibt exemplarisch die Zwischenergebnisse des Monitorings von F&E-Aktivitäten am Beispiel des Kraftstoffs Ammoniak im Detail. Hierbei dargestellt werden:

- Trendentwicklungen und F&E-Intensitäten (Anwendungsbezug zum Fahrzeug)
- Technologieführer und Institutionen (Rankings und Patentportfolios)
- Weltregionen und Patentmärkte (Relevanz und Dynamik)

#### Trendentwicklung und F&E-Intensität



**Abbildung 7-7:** Trendentwicklung Patentanmeldungen Ammoniak und Ammoniak in der Fahrzeuganwendung, 2000-2020

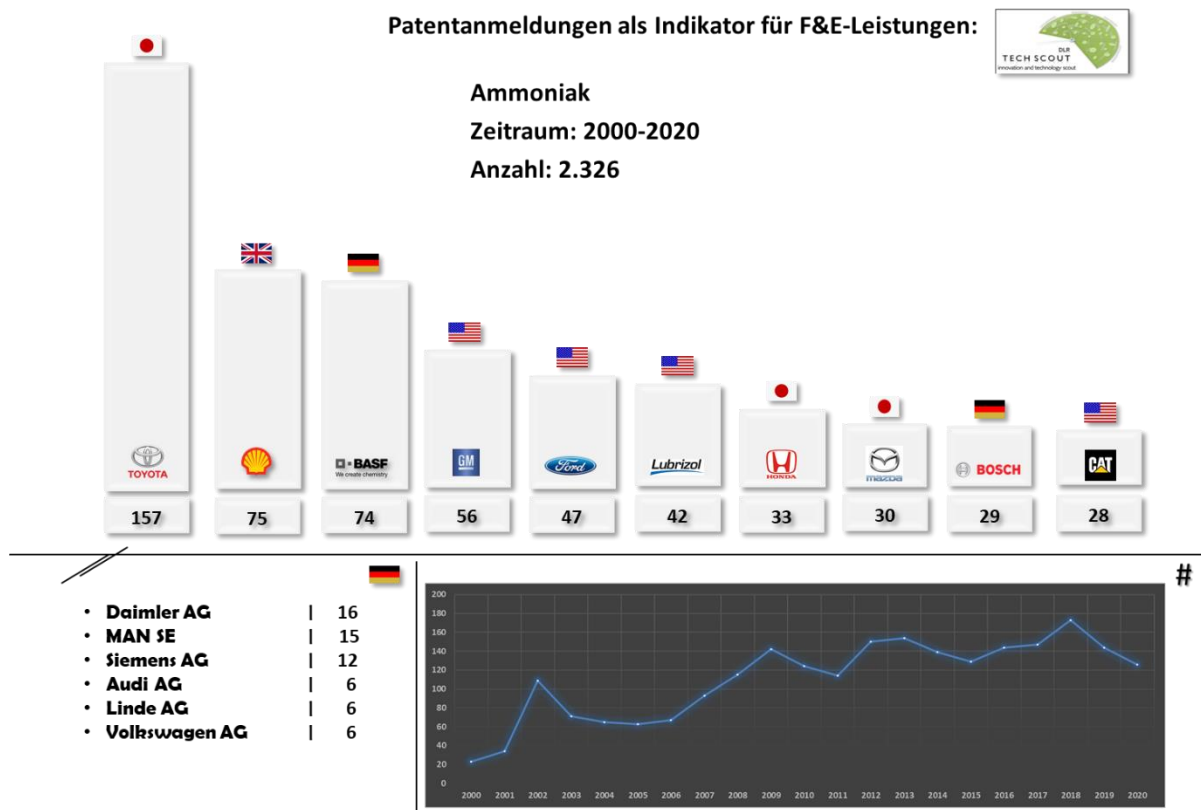
im Zeitraum der Jahre 2000 bis 2020 konnten insgesamt 2.326 Patentanmeldungen für Ammoniak identifiziert werden, davon 441 mit konkretem Anwendungsbezug zum Fahrzeug und weitere 120 mit Bezug zu maritimen Anwendungen, wie Abbildung 7-7 zeigt.

Zu sehen ist, dass die Anzahl über die Jahre insgesamt steigt, von ca. 23 auf 173 im Jahr 2018, das damit den absoluten Peak darstellt. Bis 2020 sinken die Patentanmeldungen dann wieder auf einen Wert von 126 ab.

Die konkret anwendungsbezogenen Patente mit Bezug zu Ammoniak konnten ebenfalls gesteigert werden, von nur einem im Jahr 2000 auf 37 im Jahr 2018. Der Peak in absoluten Zahlen wurde ebenfalls 2018 erreicht, dies entspricht einem Anteil von 21,4 % an allen Patentanmeldungen in diesem Jahr. Insgesamt nimmt dieser Anteil über die Jahre sogar zu: Von 16,6 % innerhalb der ersten 10 Jahre (2000-2009) auf 19,8 % im Zeitraum 2010 bis 2020. Die

F&E-Leistungen zu Ammoniak sind damit im hier durchgeführten Vergleich der betrachteten Kraftstoffe diejenigen mit dem stärksten Anwendungsbezug.

### Technologieführer und Institutionen



**Abbildung 7-8:** Technologieführer im Bereich Ammoniak, Top 10-Ranking nach Patentanmeldungen

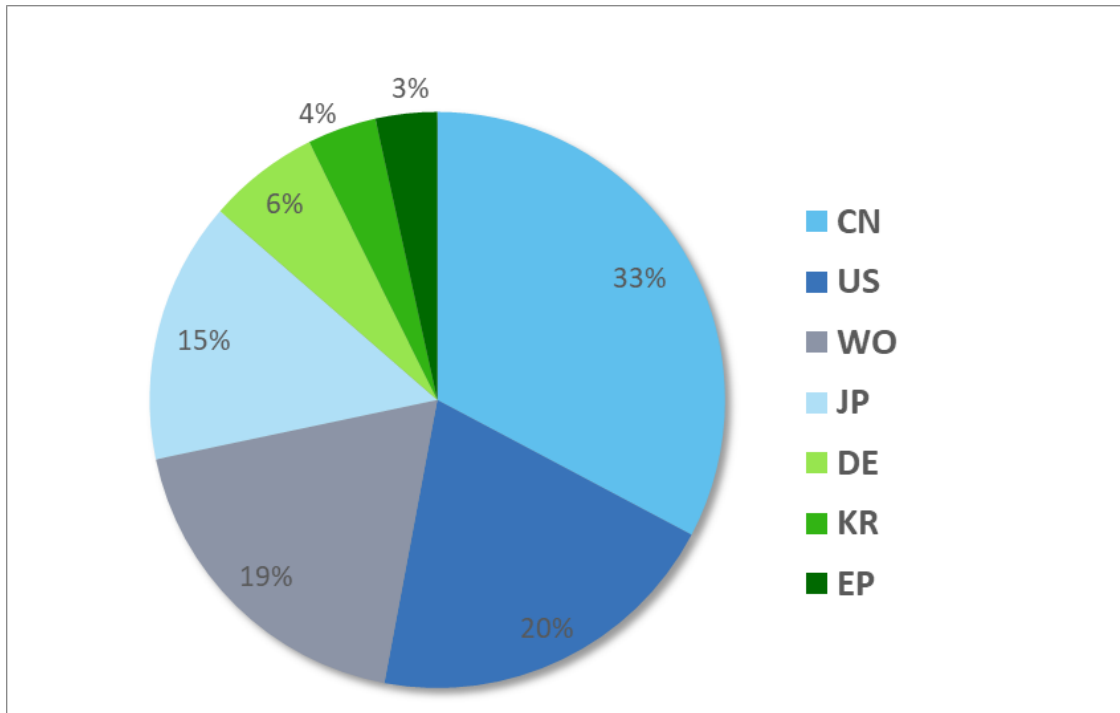
Obige Abbildung 7-8 bildet die führenden Patentanmelder auf internationaler Ebene (Top 10) sowie eine Rangliste der folgenden deutschen Unternehmen der Jahre 2000 bis 2020 ab. Insgesamt wurden in diesem Zeitraum weltweit über 2.300 Patente im Bereich Ammoniak angemeldet.

Die höchsten Anteile an den Patenten haben Institutionen und Firmen aus Japan, Großbritannien, den USA und Deutschland. Toyota ist hierbei führend (Japan, 157 Patentanmeldungen), gefolgt von Shell (Großbritannien, 75) und als erste deutsche Institution BASF (74). Mit der Robert Bosch GmbH auf Rang 8 komplettiert ein weiteres Unternehmen aus deutscher Sicht die Top 10 (29 Patentanmeldungen). Vier US-amerikanische Institutionen sind auf den Rängen 4 bis 6 sowie auf Platz 9 vertreten, darunter GM (56), Ford (47), Lubrizol (42) und Caterpillar (28). Auf Rang 7 ist mit Honda (33 Patentanmeldungen) ein weiterer japanischer Automobilhersteller vertreten, gefolgt von Mazda (30) auf Rang 8.

Chinesische Unternehmen sind bei Forschung und Entwicklung zu diesem Kraftstoff wenig repräsentiert, obwohl der chinesische Markt für die Patentanmelder eine große Rolle spielt (wie im nächsten Abschnitt beschrieben).

Unter den weiteren deutschen Unternehmen sind die Daimler AG (16), MAN SE (15), Siemens AG (12) sowie die Audi AG, Linde AG und Volkswagen AG mit jeweils 6 Patentanmeldungen vertreten.

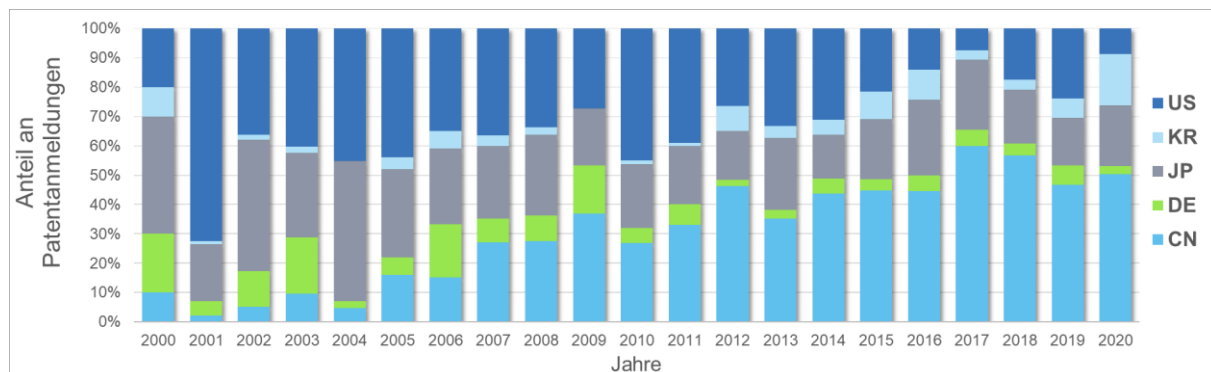
### Relevanz der Patentmärkte



**Abbildung 7-9:** Relevanz der Patentmärkte im Bereich Ammoniak, Anteil geografischer Schutzrechtsansprüche

Insgesamt wurden in dem für diese Auswertung relevanten Feld Ammoniak über 2.300 Patente veröffentlicht, wobei die Patentmärkte China (CN), USA (US), Japan (JP), Korea (KR), Deutschland (DE), Europa (EP) und Welt (WO) zusammen ca. 100 % aller Patentschriften verzeichnen konnten. Wie in Abbildung 7-9 zu sehen ist, wurde die überwiegende Mehrzahl der Patente in diesem Bereich von 2000 bis 2020 für den chinesischen Markt angemeldet (ca. 770; 33 %), gefolgt von den USA (ca. 470; 20 %), den weltweit geltenden Patentschriften (ca. 440; 19 %) und Japan (ca. 340; 15 %). Nur ca. 150 Patentschriften (6 %) wurden auf dem deutschen Markt für IP (Intellectual Property) publiziert, ca. 80 (3 %) mit europäischem Fokus, um dort Schutzrechtsansprüche geltend zu machen.

### Benchmark internationaler F&E-Aktivitäten



**Abbildung 7-10:** Benchmark der F&E-Anteile bei Patentanmeldungen im Bereich Ammoniak im internationalen Vergleich, 2000-2020

Bei Gesamtbetrachtung der F&E-Aktivitäten einer gesamten Industrie, eines Landes und / oder einer Weltregion werden Patentanmeldungen anhand der verantwortlichen Institution strukturiert und über den geografischen Hauptsitz der Institution zugeordnet. So können die Anteile an Innovationsaktivitäten über Weltregionen hinweg im Vergleich sowie deren Veränderungen bei Betrachtung über einen definierten Zeitraum, im Sinne eines Benchmarks, identifiziert werden. In der Auswertung werden die Anteile der Länder USA (US), Südkorea (KR), Japan (JP), Deutschland (DE) und China (CN) im Vergleich dargestellt. Diese sind für 1.941 der insgesamt 2.326 Patentanmeldungen verantwortlich.

Insgesamt ist über den betrachteten Zeitraum hinweg eine Verschiebung der geographischen Schwerpunkte technologischer Aktivitäten für den Kraftstoff Ammoniak zu erkennen (siehe Abbildung 7-10): Während die Anteile der US-amerikanischen Patentierungsaktivitäten von ca. 72 % im Jahr 2001 kontinuierlich abnehmen und auf nur noch ca. 9 % in 2020 sinken, steigt der Anteil chinesischer F&E-Aktivitäten im Vergleich stark an. Diese erreichen demnach ca. 50 % in 2020 (Maximum: 60 % im Jahr 2018), bei einem Ausgangswert von nur ca. 2 % in 2001. Die Jahre 2021 und 2022 sind aufgrund von zeitlichen Verzögerungen zwischen Patentanmeldung und -veröffentlichung noch in vorläufiger Auswertung und können sich bei späterer Betrachtung ändern. Eine wissenschaftlich valide Auswertung kann deshalb nur bis 2020 erfolgen.

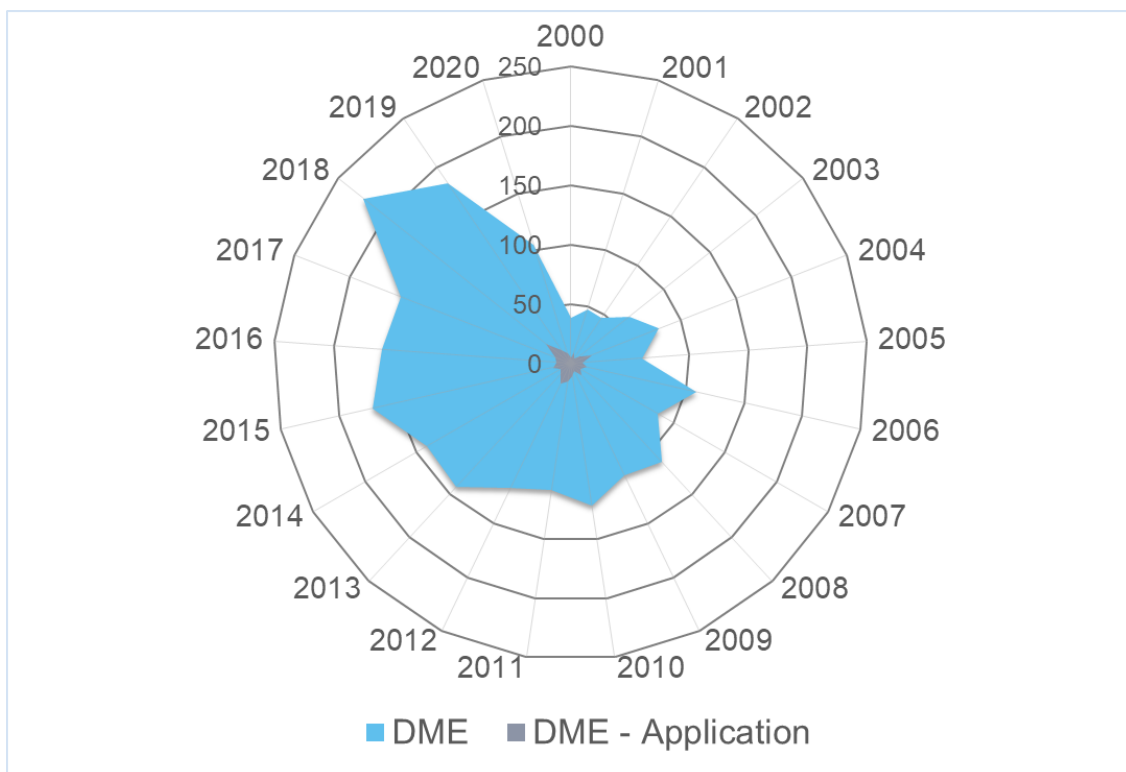
Die gesamtdeutschen Innovationsanteile schwanken, nehmen in der Tendenz jedoch ebenfalls ab. Während innerhalb der ersten zehn Jahre des Betrachtungszeitraums (2000–2009) ein Mittelwert von ca. 11,6 % Anteil erreicht wird, sinkt dieser im nachfolgenden Zeitraum (2010–2020) auf einen Mittelwert von nur noch ca. 4,6 %. Das absolute Maximum wurde im Jahr 2003 mit 19,8 % Anteil an den Patentanmeldungen erreicht. Südkorea konnte die eigenen Innovationsanteile im Zeitverlauf stärken von ca. 3 % auf ca. 5,2 % im Vergleich der beiden Betrachtungszeiträume. Im Jahr 2020 erfolgt dann ein Sprung auf ca. 17,5 %.

### 7.1.3.3 Analyse der F&E-Aktivitäten: DME in der Fahrzeuganwendung

Dieses Kapitel beschreibt exemplarisch die Zwischenergebnisse des Monitorings von F&E-Aktivitäten am Beispiel des Kraftstoffs DME im Detail. Hierbei dargestellt werden:

- Trendentwicklungen und F&E-Intensitäten (Anwendungsbezug zum Fahrzeug)
- Technologieführer und Institutionen (Rankings und Patentportfolios)
- Weltregionen und Patentmärkte (Relevanz und Dynamik)

#### Trendentwicklung und F&E-Intensität



**Abbildung 7-11:** Trendentwicklung Patentanmeldungen DME und DME in der Fahrzeuganwendung, 2000-2020

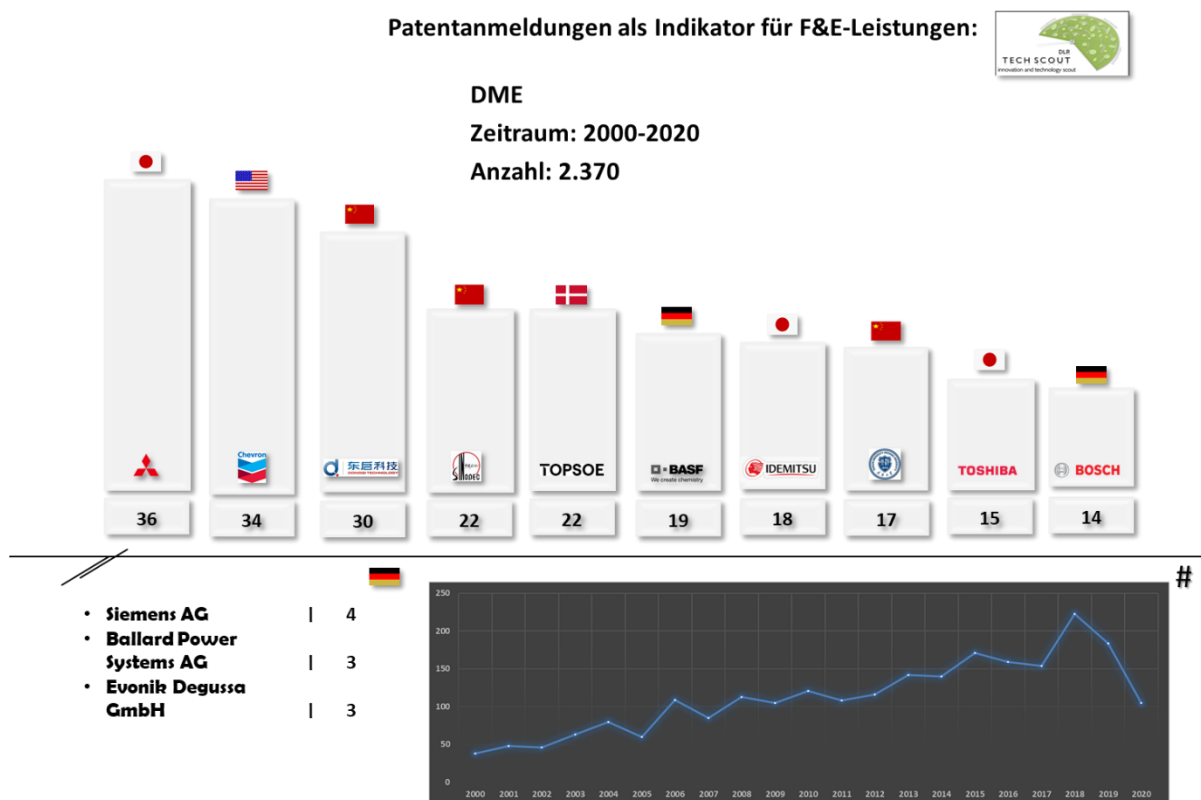
Im Zeitraum der Jahre 2000 bis 2020 konnten insgesamt 2.370 Patentanmeldungen für DME identifiziert werden, davon 261 mit konkretem Anwendungsbezug zum Fahrzeug.

In Abbildung 7-11 zu sehen ist, dass die Anzahl über die Jahre insgesamt steigt, von ca. 38 auf 223 im Jahr 2018, das damit den absoluten Peak darstellt. In 2020 wurden mit 105 Patenten weniger Anmeldungen getätigt, die Zahl kann aber bei zukünftiger Auswertung aufgrund weiterer Veröffentlichungen noch ansteigen.

Die konkret anwendungsbezogenen Patente mit Bezug zu DME konnten ebenfalls leicht gesteigert werden, von 5 im Jahr 2000 auf 27 im Jahr 2018, was einem Anteil von ca. 2,2 % an allen Patentanmeldungen entspricht. Der Peak in absoluten Zahlen wurde ebenfalls in diesem

Jahr erreicht. Insgesamt nimmt die Anwendungsintensität über die Jahre jedoch ab: Von 14,3 % innerhalb der ersten 10 Jahre (2000-2009) auf 9,9 % im Zeitraum 2010 bis 2020.

## Technologieführer und Institutionen



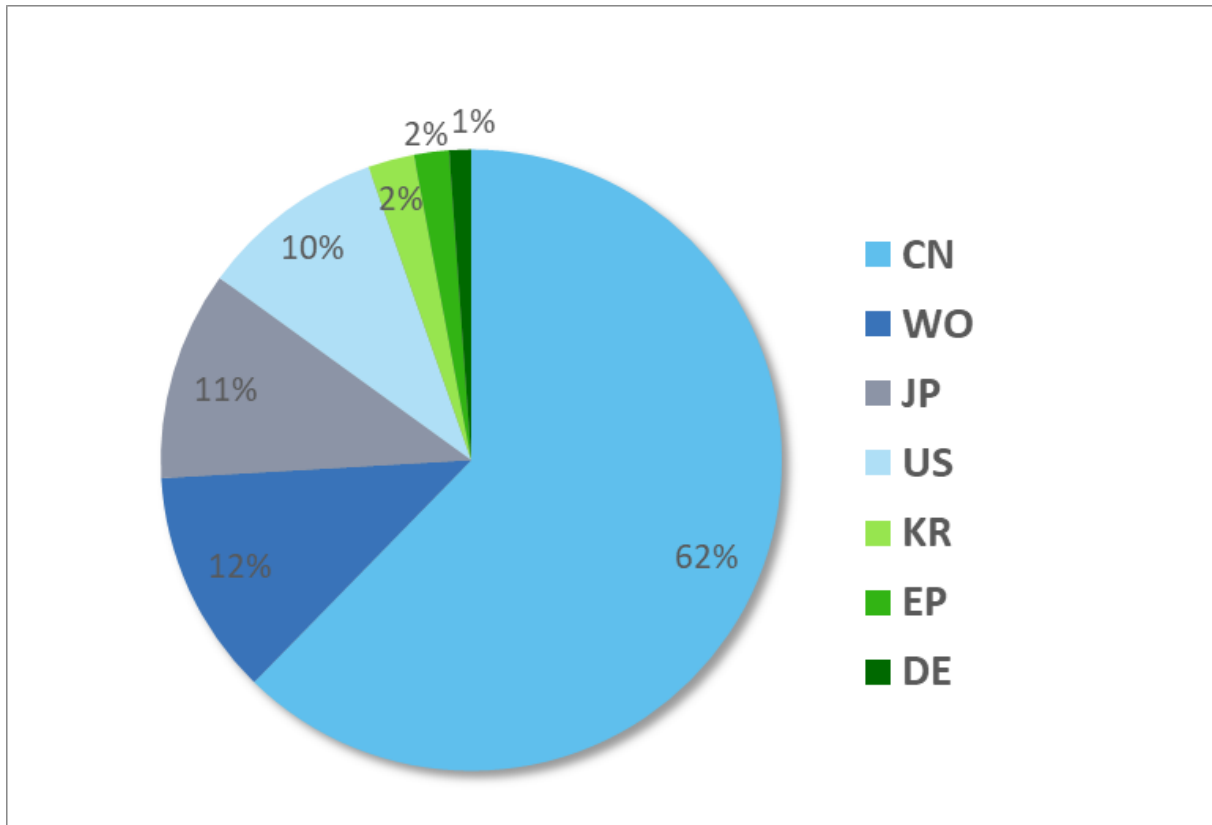
**Abbildung 7-12:** Technologieführer im Bereich DME, Top 10-Ranking nach Patentanmeldungen

Abbildung 7-12 bildet die führenden Patentanmelder auf internationaler Ebene (Top 10) sowie eine Rangliste der folgenden deutschen Unternehmen der Jahre 2000 bis 2020 ab. Insgesamt wurden in diesem Zeitraum weltweit über 2.300 Patente im Bereich DME angemeldet.

Die höchsten Anteile an den Patenten haben Institutionen und Firmen aus Japan, China, den USA und Deutschland. Auch Dänemark ist mit der Firma Haldor Topsoe auf Rang 5 (22 Patentanmeldungen) vertreten. Mitsubishi (inkl. Mitsubishi Heavy Industries) ist hierbei führend (Japan, 36 Patentanmeldungen), gefolgt von Chevron (USA, 34) und als erste chinesische Institution die Guangxi Dongqi Energy Technology Co. Ltd. (30). Zwei weitere chinesische Institutionen komplettieren die Top10 auf den Rängen 4 und 8, hierunter die China Petroleum & Chemical Corporation (22) sowie die University of Tianjin (17). Auf Rang 6 ist mit BASF (19 Patentanmeldungen) das bestplatzierte deutsche Unternehmen vertreten, zudem auf Rang 10 auch die Robert Bosch GmbH mit 14 Patentanmeldungen. Idemitsu Kosan Co. Ltd. (Japan, 18) auf Rang 7 und Toshiba (Japan, 15) auf Platz 9 komplettieren das Ranking der Unternehmen mit den absolut meisten Patenten im Patentportfolio aus japanischer Sicht.

Unter den weiteren deutschen Unternehmen sind die Siemens AG (4), die Ballard Power Systems AG (3) sowie die Evonik Degussa GmbH mit weiteren Aktivitäten in der Technologieforschung aktiv.

### Relevanz der Patentmärkte

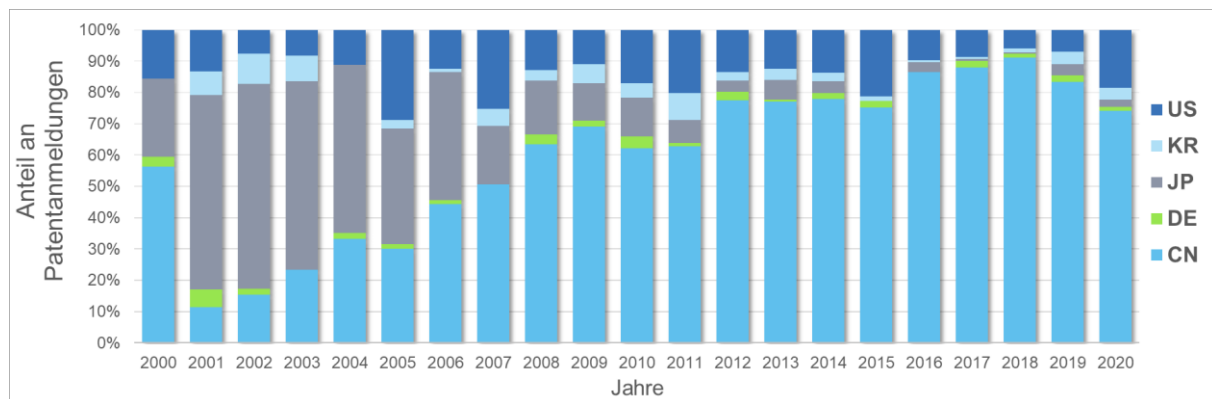


**Abbildung 7-13:** Relevanz der Patentmärkte im Bereich DME, Anteil geografischer Schutzrechtsansprüche

Insgesamt wurden in dem für diese Auswertung relevanten Feld DME über 2.300 Patente veröffentlicht, wobei die Patentmärkte China (CN), USA (US), Japan (JP), Korea (KR), Deutschland (DE), Europa (EP) und Welt (WO) zusammen ca. 95 % aller Patentschriften verzeichnen konnten (ca. 2.250). Wie in Abbildung 7-13 zu sehen, wurde die überwiegende Mehrzahl der Patente in diesem Bereich von 2000 bis 2020 in China angemeldet (ca. 1.400; 62 %), gefolgt von weltweit geltenden Patentschriften (ca. 270; 12 %), Japan (ca. 250; 11 %) und den USA (ca. 230; 10 %). Nur ca. 20 Patentschriften (1 %) wurden auf dem deutschen Markt für IP (Intellectual Property) publiziert, ca. 40 (2 %) mit europäischem Fokus, um dort Schutzrechtsansprüche geltend zu machen.



### Benchmark internationaler F&E-Aktivitäten



**Abbildung 7-14:** Benchmark der F&E-Anteile bei Patentanmeldungen im Bereich DME im internationalen Vergleich, 2000-2020

Bei Gesamtbetrachtung der F&E-Aktivitäten einer gesamten Industrie, eines Landes und / oder einer Weltregion werden Patentanmeldungen anhand der verantwortlichen Institution strukturiert und über den geografischen Hauptsitz der Institution zugeordnet. So können die Anteile an Innovationsaktivitäten über Weltregionen hinweg im Vergleich sowie deren Veränderungen bei Betrachtung über einen definierten Zeitraum, im Sinne eines Benchmarks, identifiziert werden. In der Auswertung werden die Anteile der Länder USA (US), Südkorea (KR), Japan (JP), Deutschland (DE) und China (CN) im Vergleich dargestellt. Diese sind für ca. 2.100 der insgesamt ca. 2.350 Patentanmeldungen verantwortlich.

Auch bei Analyse dieses Kraftstoffs ist ebenfalls eine starke Verschiebung der geographischen Schwerpunkte bei Innovationsaktivitäten im Verlauf der Zeit zu erkennen (siehe Abbildung 7-14): Während die Anteile der japanischen Industrie von ca. 62 % im Jahr 2001 auf nur noch ca. 2,5 % in 2020 sinken, steigt der Anteil chinesischer F&E-Aktivitäten im Vergleich extrem an. Diese erreichen demnach ca. 74 % in 2020 (Maximum: 91 % im Jahr 2018), bei einem Ausgangswert von nur ca. 11 % in 2001. Die Jahre 2021 und 2022 sind aufgrund von zeitlichen Verzögerungen zwischen Patenteinreichung und -veröffentlichung noch in vorläufiger Auswertung und können sich bei späterer Betrachtung ändern. Eine wissenschaftlich valide Auswertung kann deshalb nur bis 2020 erfolgen.

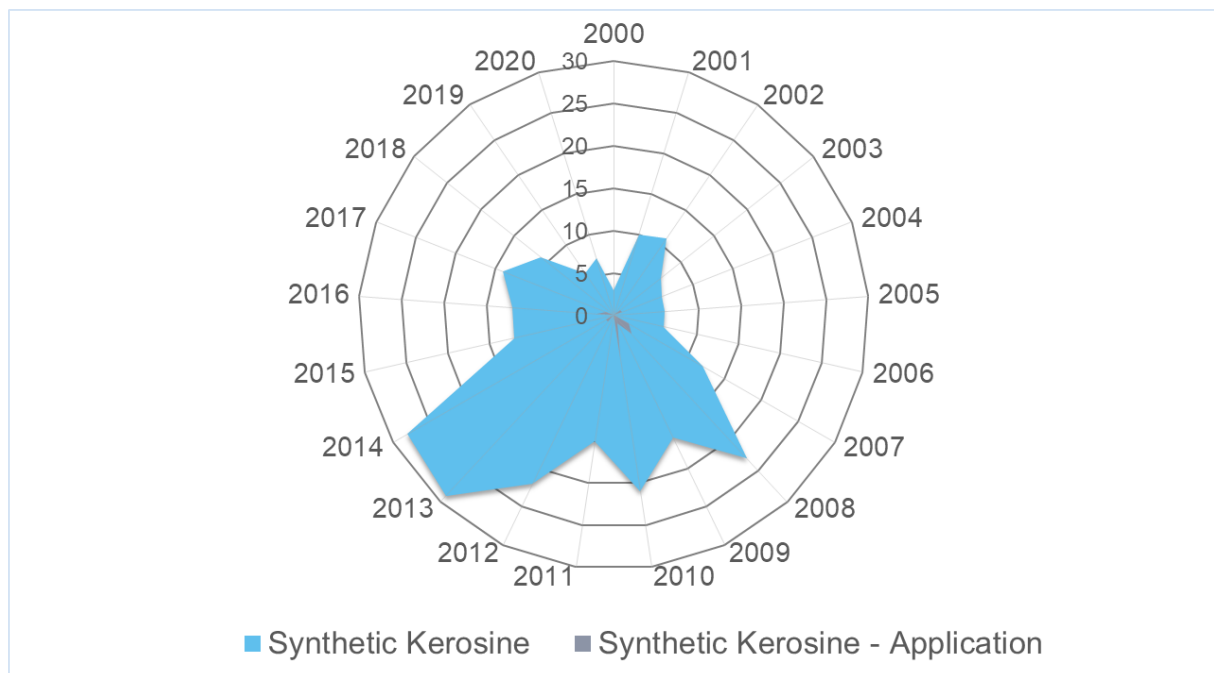
Die gesamtdeutschen Innovationsanteile konnten im Betrachtungszeitraum nicht gesteigert werden. Diese sinken sogar leicht von ca. 3 % in 2000 auf 1,2 % in 2020. Auch der Mittelwert bleibt in Betrachtung der Zeiträume 2000-2009 (ca. 2 %) und 2010–2020 (ca. 1,7 %) relativ konstant, jedoch mit sinkender Tendenz. Südkorea besitzt in Relation zu Deutschland ungefähr doppelt so hohe Innovationsanteile im Vergleich der beiden Betrachtungszeiträume (4,4 % Mittelwert 2000-2009; 3,1 % Mittelwert 2010-2020). Die USA können die F&E-Anteile über die Jahre mit leichten Schwankungen relativ konstant bei ca. 14 % im Mittel halten, aber ebenfalls mit insgesamt leicht abnehmender Tendenz.

### 7.1.3.4 Analyse der F&E-Aktivitäten: Synthetisches Kerosin in der Anwendung

Dieses Kapitel beschreibt exemplarisch die Zwischenergebnisse des Monitorings von F&E-Aktivitäten am Beispiel des Treibstoffs synthetisches Kerosin im Detail. Hierbei dargestellt werden:

- Trendentwicklungen und F&E-Intensitäten (Anwendungsbezug zum Fahrzeug)
- Technologieführer und Institutionen (Rankings und Patentportfolios)
- Weltregionen und Patentmärkte (Relevanz und Dynamik)

#### Trendentwicklung und F&E-Intensität



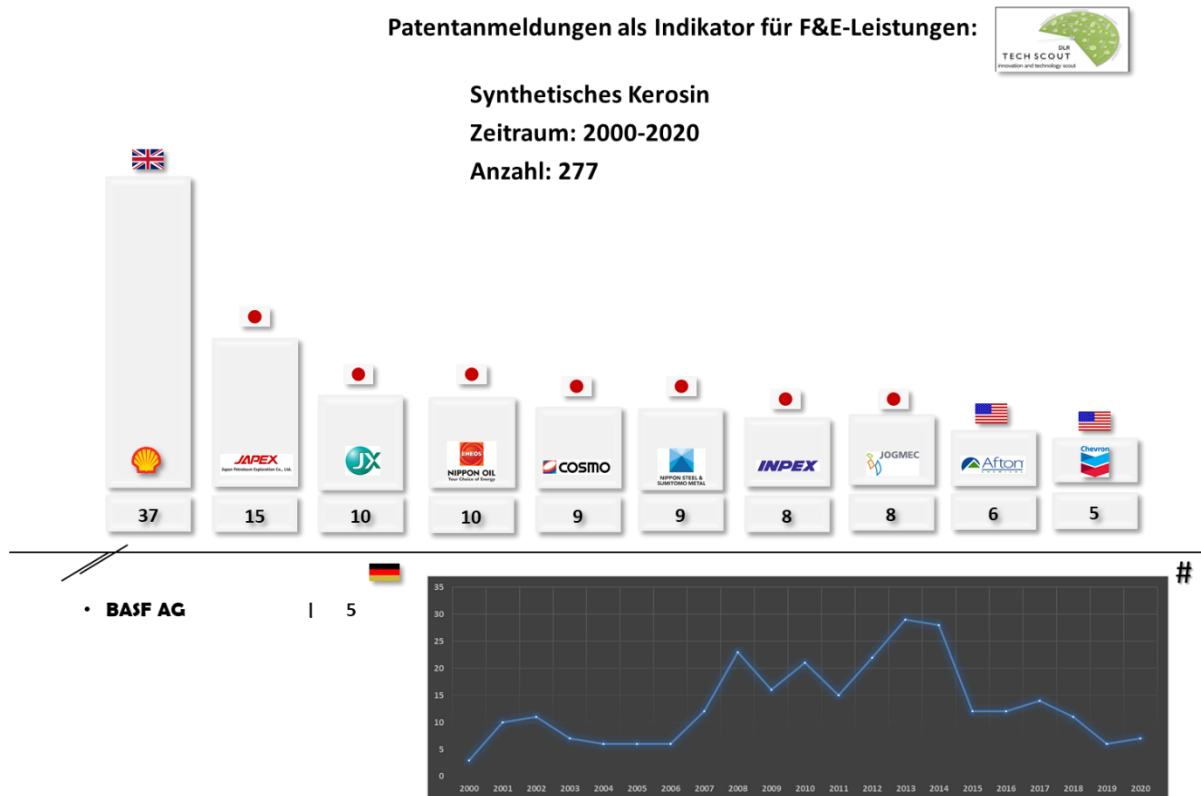
**Abbildung 7-15:** Trendentwicklung Patentanmeldungen Synthetisches Kerosin und Synthetisches Kerosin in der Fahrzeuganwendung, 2000-2020

Im Zeitraum der Jahre 2000 bis 2020 konnten insgesamt 277 Patentanmeldungen für synthetisches Kerosin identifiziert werden, davon 20 mit konkretem Anwendungsbezug.

Wie in Abbildung 7-15 zu sehen, steigt die Gesamtzahl der Patentanmeldungen im Laufe des Betrachtungszeitraums an: von 3 im Jahr 2000 auf 29 im Jahr 2013, das damit den absoluten Peak darstellt. Danach fallen die Patentanmeldungen bis 2020 wieder auf einen Wert von nur noch 7.

Die konkret anwendungsbezogenen Patente mit Bezug zu synthetischem Kerosin schwanken im Betrachtungszeitraum auf insgesamt sehr niedrigem Niveau zwischen 0 und 5 pro Jahr. Das Maximum von 5 anwendungsbezogenen Patentanmeldungen wurde im Jahr 2010 erreicht. Insgesamt nimmt die Anwendungsintensität über die Jahre leicht ab: Von 7,7 % innerhalb der ersten 10 Jahre (2000-2010) auf 6,3 % im Zeitraum 2011 bis 2018.

## Technologieführer und Institutionen

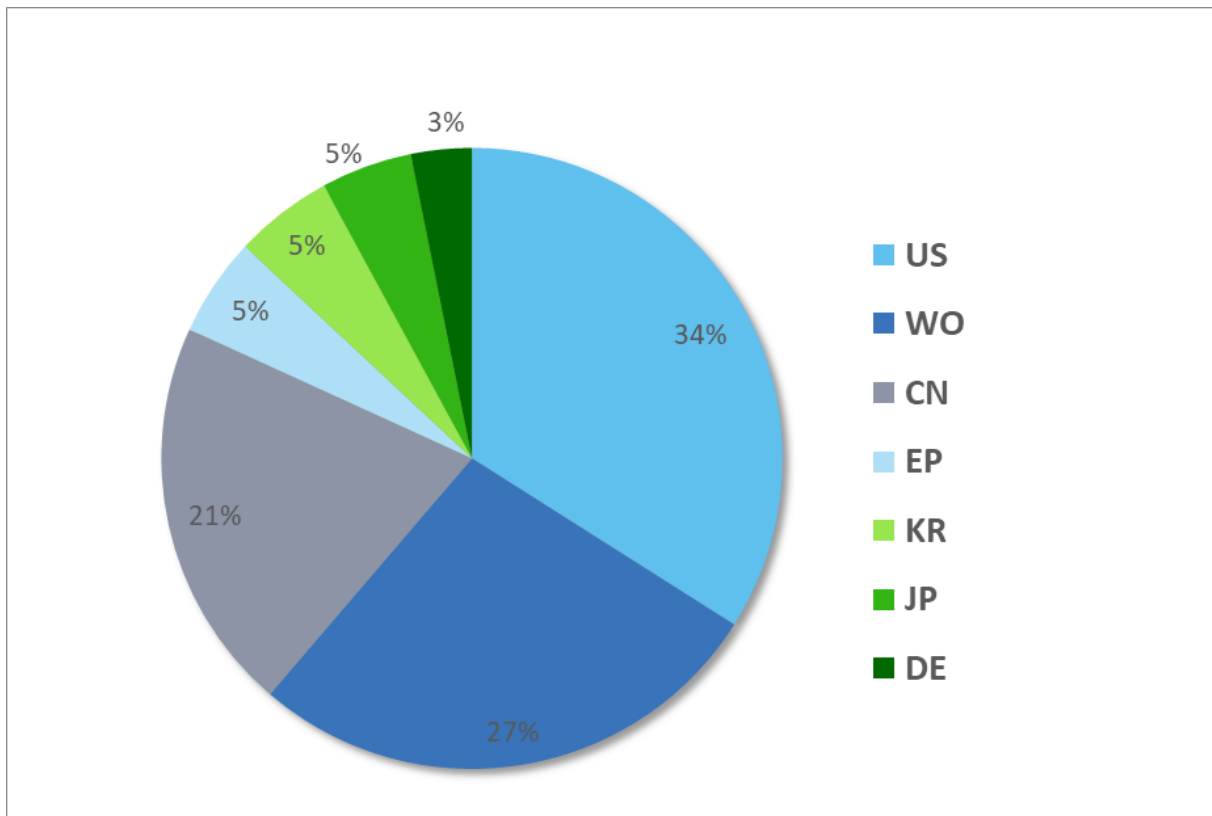


**Abbildung 7-16:** Technologieführer im Bereich Synthetisches Kerosin, Top10-Ranking nach Patentanmeldungen

Abbildung 7-16 bildet die führenden Patentanmelder auf internationaler Ebene (Top 10) sowie eine Rangliste der folgenden deutschen Unternehmen der Jahre 2000 bis 2020 ab. Insgesamt wurden in diesem Zeitraum weltweit über 270 Patente im Bereich Synthetisches Kerosin angemeldet.

Die höchsten Anteile an den Patenten haben Institutionen und Firmen aus Großbritannien, Japan und den USA. Shell (Großbritannien, 37 Patentanmeldungen) ist hierbei führend, gefolgt von 7 japanischen Institutionen auf den Rängen 2 (Japan Petroleum Exploration Co. Ltd., 15) bis 8 (Japan Oil, Gas and Metals National Corporation, 8). Zwei weitere US-amerikanische Unternehmen vervollständigen die Top10, hierunter die Afton Chemical Corporation (6) auf Rang 9 und Chevron (5) auf Rang 10. Das einzige deutsche Unternehmen mit F&E-Aktivitäten bei synthetischem Kerosin ist in dieser Untersuchung BASF mit ebenfalls 5 Patentanmeldungen im Betrachtungszeitraum.

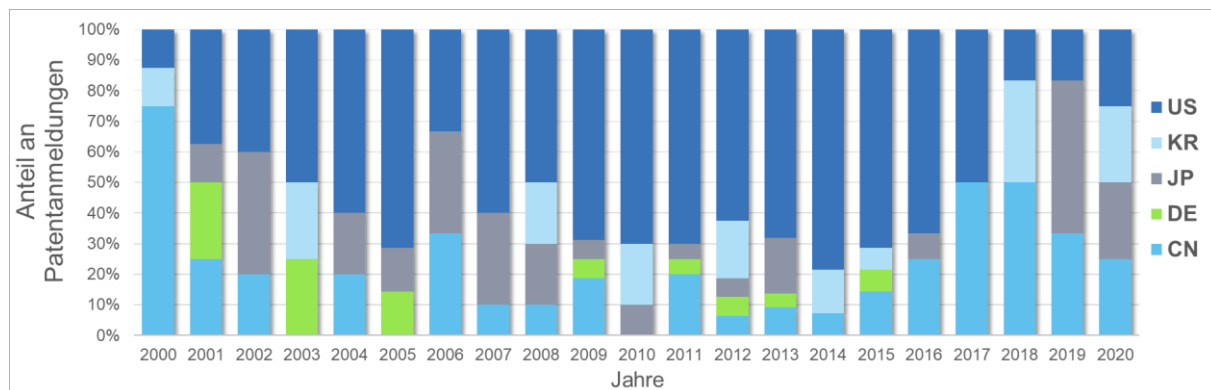
### Relevanz der Patentmärkte



**Abbildung 7-17:** Relevanz der Patentmärkte im Bereich Synthetisches Kerosin, Anteil geografischer Schutzrechtsansprüche

Insgesamt wurden in dem für diese Auswertung relevanten Feld Synthetisches Kerosin über 270 Patente veröffentlicht, wobei die Patentmärkte China (CN), USA (US), Japan (JP), Korea (KR), Deutschland (DE), Europa (EP) und Welt (WO) zusammen ca. 91 % aller Patentschriften verzeichnen konnten (ca. 250). Wie in Abbildung 7-17 zu sehen, wurde die überwiegende Mehrzahl der Patente in diesem Bereich von 2000 bis 2020 für den US-amerikanischen Markt angemeldet (86, 34 %), gefolgt von weltweit geltenden Patentschriften (68; 27 %), China (53; 21 %) sowie gleichverteilt Japan, Korea und Europa (jeweils ca. 13 Patentanmeldungen; 5 %). Nur 7 Patentschriften (3 %) wurden auf dem deutschen Markt für IP (Intellectual Property) publiziert, um dort Schutzrechtsansprüche geltend zu machen.

### Benchmark internationaler F&E-Aktivitäten



**Abbildung 7-18:** Benchmark der F&E-Anteile bei Patentanmeldungen im Bereich Synthetisches Kerosin im internationalen Vergleich, 2000-2020

Bei Gesamtbetrachtung der F&E-Aktivitäten einer gesamten Industrie, eines Landes und / oder einer Weltregion werden Patentanmeldungen anhand der verantwortlichen Institution strukturiert und über den geografischen Hauptsitz der Institution zugeordnet. So können die Anteile an Innovationsaktivitäten über Weltregionen hinweg im Vergleich sowie deren Veränderungen bei Betrachtung über einen definierten Zeitraum im Sinne eines Benchmarks identifiziert werden. In der Auswertung werden die Anteile der Länder USA (US), Südkorea (KR), Japan (JP), Deutschland (DE) und China (CN) im Vergleich dargestellt. Diese sind für 212 der insgesamt 277 Patentanmeldungen verantwortlich.

Insgesamt ist eine deutliche Dominanz US-amerikanischer Technologieaktivitäten über den Betrachtungszeitraum zu erkennen. Eine eindeutige Verschiebung von geographischen Schwerpunkten findet bei Gesamtbetrachtung nicht statt (siehe Abbildung 7-18): Die Anteile US-amerikanischer Innovationsleistungen liegen im Mittel der Jahre 2000–2009 bei ca. 48 %, im darauf folgenden Betrachtungszeitraum bis 2020 steigen diese nochmals auf ca. 54 % an. Im Zeitraum der Jahre 2009 bis 2016 betragen die Anteile sogar kontinuierlich 60 % bis 70 % im Vergleich der einzelnen Länder. Das absolute Maximum der US-amerikanischen Anteile wurde mit ca. 79 % im Jahr 2014 erzielt. In den letzten drei Jahren dieser Betrachtung allerdings können chinesische, japanische und koreanische Unternehmen deutliche Anstiege in den Innovationsaktivitäten verzeichnen.

Deutsche Anteile an F&E-Leistungen bei diesem Kraftstoff unterliegen starken Schwankungen und reichen von 0 % bis 25 % Anteil pro Jahr. Letzterer Wert wurde in den Jahren 2001 und 2003 erzielt. Im Mittel sinken die deutschen Anteile ab von ca. 7 % im Zeitraum der Jahre 2000–2009 auf nur noch 2 % von 2010–2020. In den letzten sechs Jahren dieser Betrachtung (ab 2016) können überhaupt keine, über Patente gesicherten, Technologieaktivitäten von Unternehmen mit Hauptsitz in Deutschland erkannt werden.

#### **7.1.4 Publikationsaktivitäten: Themenfelder und Auswahl von „High Potentials“**

Im Folgenden wird die Auswertung der Publikationsaktivitäten zu synthetischen Kraftstoffen auf übergeordneter, ungerichteter Ebene sowie jeweils nachfolgend die Analysen auf Anwendungsebene mit konkretem Bezug zu bestimmten Fahrzeugen und Fahrzeugkonzepten (Pkw/Lkw, Schifffahrt, Luftfahrt) dargestellt. Zur Analyse der Publikationen auf übergeordneter Ebene wurde für den jeweiligen synthetischen Kraftstoff eine dezidierte Suchstrategie entwickelt und eine Publikationsrecherche in der Scopus Datenbank durchgeführt. Scopus ist eine quellenneutrale Abstract- und Zitationsdatenbank mit über 84 Millionen Datensätzen. Dabei wurden die Datensätze der Scopus Datenbank mit Hilfe der „Advanced search“ Suchmöglichkeit, gemäß vordefinierter Suchmethodik nach den verschiedenen synthetischen Kraftstoffen in Titel, Abstract und den Keywords gesucht und anschließend mit einer Stichwortsuche nach der entsprechenden Anwendung kombiniert. Die Analyse selbst wurde weltweit durchgeführt und umfasst den Zeitraum der Jahre 2000 bis 2020.

Zur Identifikation der sog. High Potentials aus F&E-Perspektive werden in einem ersten Schritt jeweils die Gesamtanzahl der identifizierten Veröffentlichungen insgesamt dargestellt, nachfolgend dann je Kraftstoff die Gesamtzahl der Veröffentlichungen mit konkretem Anwendungsbezug sowie die Anzahl der Veröffentlichungen zu „synthetischem“ bzw. „grünem“ Kraftstoff. Im Verhältnis dieser Indikatoren über die Zeit lässt sich eine Tendenz für eine ggfs. anwendungs- und damit marktnähere Technologieposition ableiten.

Anteilig (in %) und / oder über die Zeit (Gesamtzahl p. a.) soll anschließend für verschiedene Kraftstoffe die Publikationsaktivität nach Weltregionen im Vergleich dargestellt und interpretiert werden. Die Analyse der Publikationen dient der Bewertung von Veränderungen in der Struktur und Bedeutung des jeweiligen Marktes.

Die für diese Analyse betrachteten Technologiefelder umfassen diejenigen Kraftstoffe, die von den technischen Verbänden beforscht werden. Der Fokus der Publikationsanalyse liegt auf den folgenden Kraftstoffen (absteigend sortiert nach Gesamtzahl der Publikationen im Untersuchungszeitraum; in Klammern der entsprechende Suchbegriff für die Scopus Suchmethodik):

- Wasserstoff (“hydrogen”)
- Ethanol (“ethanol”)
- Methanol (“methanol”)
- Methan (“methane”)
- Ammoniak (“ammonia”)
- Diesel (“diesel”)
- Benzin (“gasoline”)
- Kerosin (“kerosene”)
- DME (“dimethyl ether”)
- DMC (“dimethyl carbonate”)
- OME (“oxymethylene ether”)
- HCNG (“hcng”)

Insgesamt konnten in o.g. Untersuchungsfeldern mehr als 1,3 Millionen Publikationen seit dem Jahr 2000 identifiziert werden, davon mehr als 40.000 mit konkretem Anwendungsbezug. Bei insgesamt über 25 Mio. identifizierten Veröffentlichungen ohne Kraftstoff-Suchbegriff entspricht dies einem Anteil von 5 % aller in dem gleichen Zeitraum veröffentlichten technischen Scopus-Publikationen.

In absolutem Vergleich der reinen Publikationszahlen im genannten Zeitraum ergibt sich das in Tabelle 7-2 dargestellte Ergebnis, mit z. T. stark differierenden Werten für die einzelnen Kraftstoffe. Neben der Gesamtzahl veröffentlichter Publikationen ist ebenfalls die Publikationszahl der Veröffentlichungen aufgeführt, die konkret mit einer Anwendung im Fahrzeug („vehicle“) korrelieren. Die sich daraus ergebende Anwendungsintensität berechnet sich aus dem Verhältnis der Veröffentlichungen mit Anwendungsbezug zu der Gesamtanzahl aller Veröffentlichungen des jeweiligen Kraftstoffes, gemittelt über die Jahre 2000 bis 2019. Ebenfalls wird die Anzahl an Veröffentlichungen mit Bezug zu synthetischem Kraftstoff dargestellt. Dabei sind Veröffentlichungen berücksichtigt, welche dem synthetischen bzw. grünen Kraftstoff sowie ebenfalls speziellen Fachbegriffen wie „Sustainable Aviation Fuel“, „Methanol to Gasoline“, oder „RFNBO“ zugeordnet werden können. Zusätzlich werden die Wachstumstrends im Vergleich der betrachteten Zeiträume 2000-2009 („Nullerjahre“) vs. 2010-2019 („Zehnerjahre“) prozentual dargestellt (dunkelblauer Pfeil = überdurchschnittlicher Wachstumstrend im Vergleich zum Trend aller technischer Scopus-Publikationen, hellblauer Pfeil = Wachstum aber unterdurchschnittlich, grauer Pfeil = negatives Wachstum).

**Tabelle 7-2:** Übersicht der Publikationsanalyse für synthetische Kraftstoffe und Trendentwicklung

Kraftstoff	Publikationen gesamt	Publikationen mit Anwendungsbe- zug Fahrzeug	Anwendungs- intensität (Mittelwert 2000-2019)	Publikationen mit Bezug zu synthetischem Kraftstoff
Wasserstoff	660.503	9.047	1,4 %	275
Ethanol	136.500	2.506	1,8 %	38
Methanol	136.028	1.028	0,8 %	56
Methan	123.100	1.866	1,5 %	91
Ammoniak	98.690	1.148	1,2 %	146
Diesel	98.221	14.379	14,6 %	592
Benzin	61.849	9.744	15,8 %	380
Kerosin	10.986	372	3,4 %	74
DME	7.063	168	2,4 %	3
DMC	3.424	26	0,8 %	2
OME	34	4	11,8 %	-
HCNG	186	49	26,3 %	-

Knapp die Hälfte der identifizierten Veröffentlichungen können dem Untersuchungsfeld Wasserstoff zugeordnet werden. Gefolgt von den Alkoholen Ethanol und Methanol sowie Methan und Ammoniak. Den „klassischen“ Kraft- und Treibstoffen Benzin, Diesel und Kerosin können insgesamt etwa 170.000 Scopus-Veröffentlichungen zugeordnet werden. Allerdings mit einer deutlich größeren Anwendungsintensität von 3,4-15,8 % im Vergleich zu der mit 0,8-1,8 % eher geringen, fahrzeugbezogenen Anwendungsintensität von Publikationen mit Bezug zu Wasserstoff, Methan, Ethanol, Methan und Ammoniak.

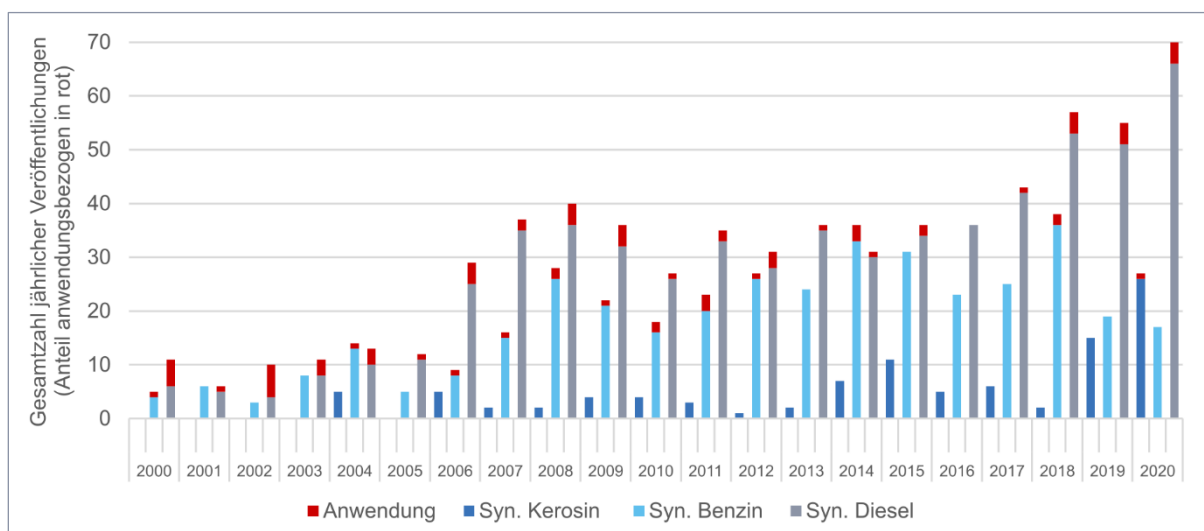


Der Wachstumstrend von allgemeinen Publikationen, welche den betrachteten Kraftstoffen zugeordnet werden können, ist überwiegend positiv. Allerdings steigt die Anzahl der Veröffentlichungen nur für HCNG, Ethanol, Ammoniak, DMC, Methan und Benzin überdurchschnittlich, im Vergleich zum allgemeinen Anstieg der technischen Scopus-Veröffentlichungen von +64 % im Vergleich der vorangegangenen Dekaden. In Bezug auf die Anwendung zeigt sich bei Methanol und DME ein Rückgang an Veröffentlichungen im Zeitraum von 2010-2019 im Vergleich zur vorherigen Dekade.

Im Zeitraum der Jahre 2000 bis 2020 konnten insgesamt 1.046 Publikationen für die synthetischen Kraftstoffe Benzin, Diesel und Kerosin identifiziert werden. Für synthetischen Diesel lassen sich beinahe doppelt so viele Veröffentlichungen identifizieren wie für synthetisches Benzin. Diese umfassen in der Gesamtanalyse alle Veröffentlichungen mit Bezug auf den jeweiligen synthetischen bzw. grünen Kraftstoff und damit sowohl Grundlagen-, Anwendungs- als auch Produktions-orientierte Forschung.

In Bezug auf die synthetischen Kraftstoffe lässt sich ein überwiegend positiver Trend an Veröffentlichungen im Vergleich der verschiedenen Dekaden erkennen. Im Gegensatz zu den allgemeinen Veröffentlichungen, liegt der Trend für „grüne“ oder „synthetische“ Kraftstoffe für alle betrachteten Kraftstoffe über dem durchschnittlichen Anstieg an allgemeinen technischen Scopus-Veröffentlichungen.

Abbildung 7-19 zeigt diesen deutlichen Anstieg an Publikationen in Bezug auf die synthetischen Drop-In-Kraftstoffe Kerosin, Benzin und Diesel. Während Anfang der Nullerjahre jeweils weniger als zehn jährliche Veröffentlichungen identifiziert wurden, so steigt die Anzahl an identifizierten Veröffentlichungen in der anschließenden Dekade auf bis zu 70 jährliche Veröffentlichungen im Falle des synthetischen Diesel-Kraftstoffes.



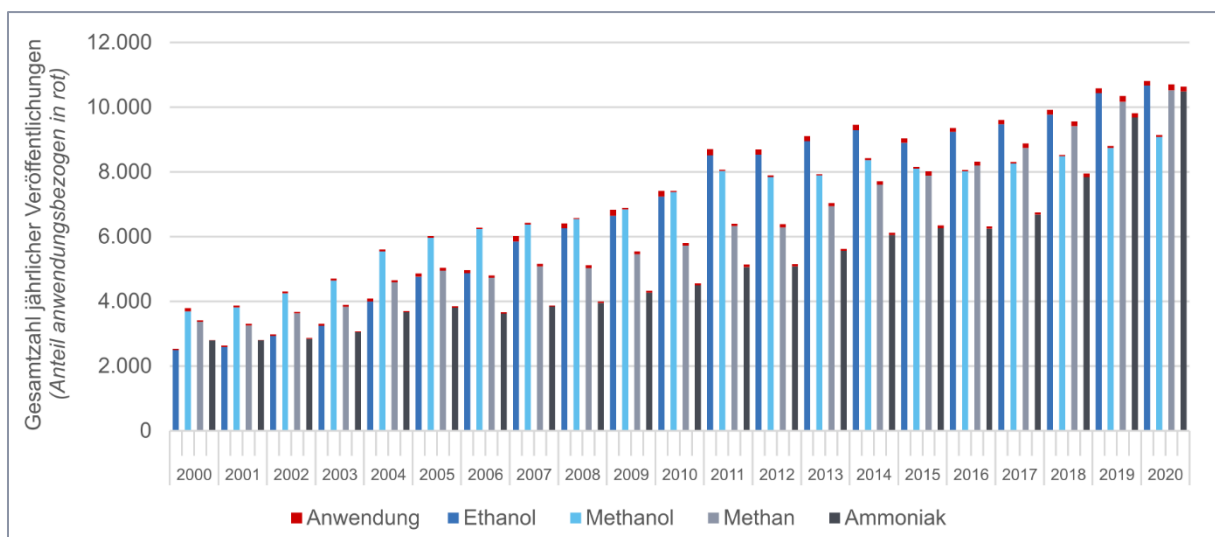
**Abbildung 7-19:** Anzahl jährliche, auf Scopus veröffentlichte Publikationen für synthetisches Kerosin, Benzin und Diesel. Jeweils gesamt sowie mit Anwendungsbezug Fahrzeug im Vergleich für die Jahre 2000-2020.

Die Anzahl an Publikationen der eher gängigen chemischen Stoffe wie Ethanol, Methanol, Methan und Ammoniak, von 2000 bis 2020, liegt mit 494.000 deutlich über der Anzahl an

Veröffentlichungen mit Bezug auf klassische drop-in-fähige Kraftstoffe. Dies könnte daran liegen, dass diese Stoffe in der chemischen Industrie deutlich verbreiteter sind.

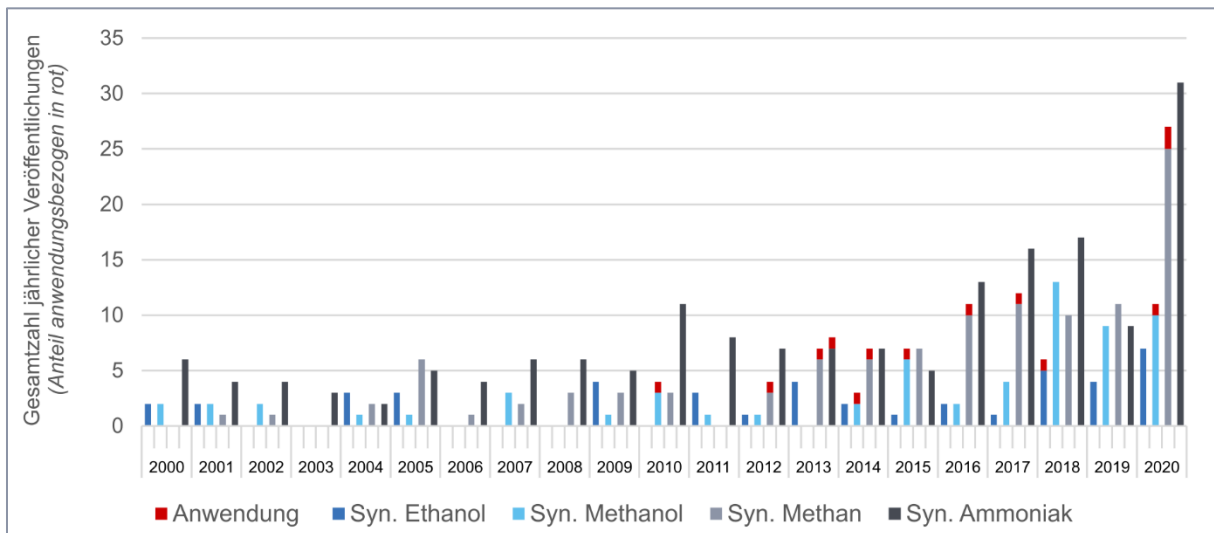
Abbildung 7-20 zeigt den deutlich positiven Trend an jährlichen Veröffentlichungen von in Summe über 12.000 Veröffentlichungen mit Bezug auf die verschiedenen Kraftstoffe im Jahr 2000 auf über 41.000 Publikationen im Jahr 2020. Dabei lässt sich ein stärkerer Anstieg an Veröffentlichungen mit Bezug auf Ethanol (+106 % im Vergleich der beiden vorangegangenen Dekaden), verglichen mit dem Anstieg der Ammoniak- (+82 %), Methan- (+76 %) und Methanol-Publikationen (+50 %), erkennen. Dabei liegt die Wachstumsrate bei Ethanol, Ammoniak und Methan über der durchschnittlichen Wachstumsrate für technische Scopus-Publikationen.

Ebenfalls stieg der Anteil an anwendungsorientierten Veröffentlichungen von Ethanol, von 965 in den Nullerjahren auf 1.541 in den Zehnerjahren und Methan (von 651 auf 1.215), während der von Methanol leicht rückläufig ist (von 553 auf 475). Ammoniak zeigt dagegen ein starkes Wachstum an anwendungsorientierten Publikationen von 345 auf 803, was einer Wachstumsrate von +133 % entspricht. Dabei steigt ebenfalls die Anwendungsintensität der Publikationen mit Bezug auf Ammoniak von 1,0 % auf 1,3 %. Die Anwendungsintensität in Bezug auf Ethanol (von 2,2 % auf 1,7 %) und Methanol (von 1,0 % auf 0,6 %) nimmt über die Zeit dagegen leicht ab. Für Methan bleibt die Anwendungsintensität konstant bei 1,5 %.



**Abbildung 7-20:** Anzahl jährliche auf Scopus veröffentlichte Publikationen für Ethanol, Methanol, Methan und Ammoniak. Jeweils gesamt sowie mit Anwendungsbezug Fahrzeug im Vergleich für die Jahre 2000-2020.

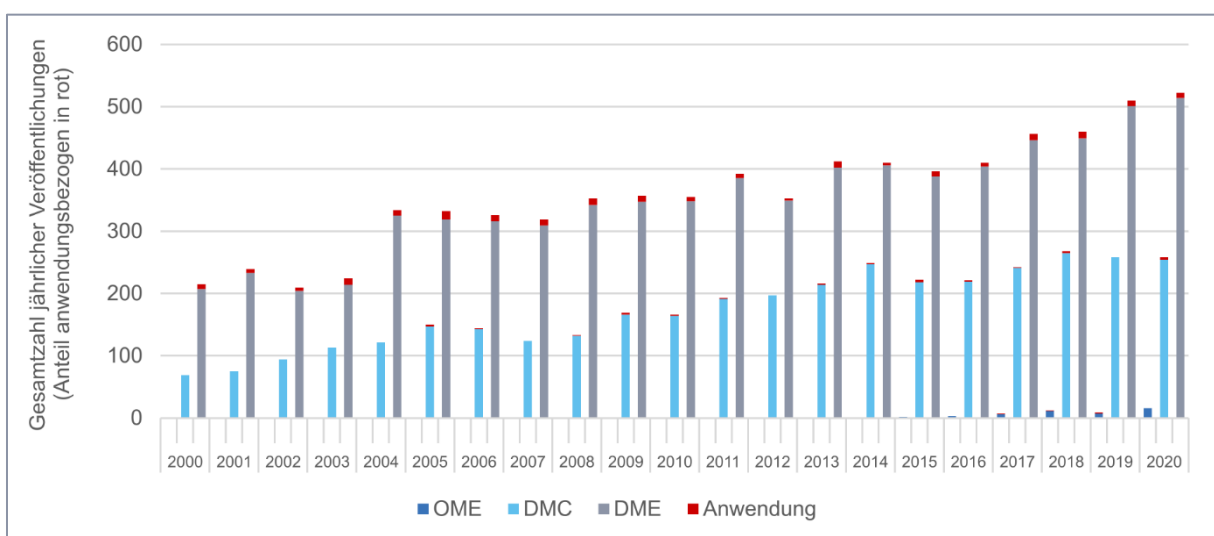
Betrachtet man die Anzahl an Veröffentlichungen mit Bezug zu synthetisch hergestelltem Ethanol, Methanol, Methan oder Ammoniak, zeigt sich sogar ein noch größerer Wachstumstrend im Hinblick auf die Veröffentlichungen zu Ammoniak, Methan und Methanol. Insgesamt wurden 331 Publikationen mit Bezug zu „grünem“ oder „synthetischem“ Ethanol, Methanol, Methan oder Ammoniak identifiziert. Dies entspricht nur etwa einem Drittel der ermittelten Veröffentlichungen zu den drop-in-fähigen Kraftstoffen. Im Vergleich zu Ethanol (38) und Methanol (56) konnten am meisten Veröffentlichungen zu synthetischem Ammoniak (146) und Methan (91) zugeordnet werden.



**Abbildung 7-21:** Anzahl jährliche auf Scopus veröffentlichte Publikationen für synthetisches Ethanol, Methanol, Methan und Ammoniak. Jeweils gesamt sowie mit Anwendungsbezug Fahrzeug („vehicle“) im Vergleich für die Jahre 2000-2020.

Die Oxygenate OME, DMC und DME weisen ebenfalls einen deutlichen Wachstumstrend im Hinblick auf allgemeine Publikationen auf. Die Entwicklung der Veröffentlichungszahlen ist in Abbildung 7-22 dargestellt. Während zu OME in den Nullerjahren noch keine Veröffentlichung identifiziert werden konnte, stieg die Anzahl an Publikationen von DMC und DME gegenüber den Nullerjahren um +87 % bei DMC bzw. +43 % bei DME an. Für OME konnten ab 2014 erste Veröffentlichungen identifiziert werden.

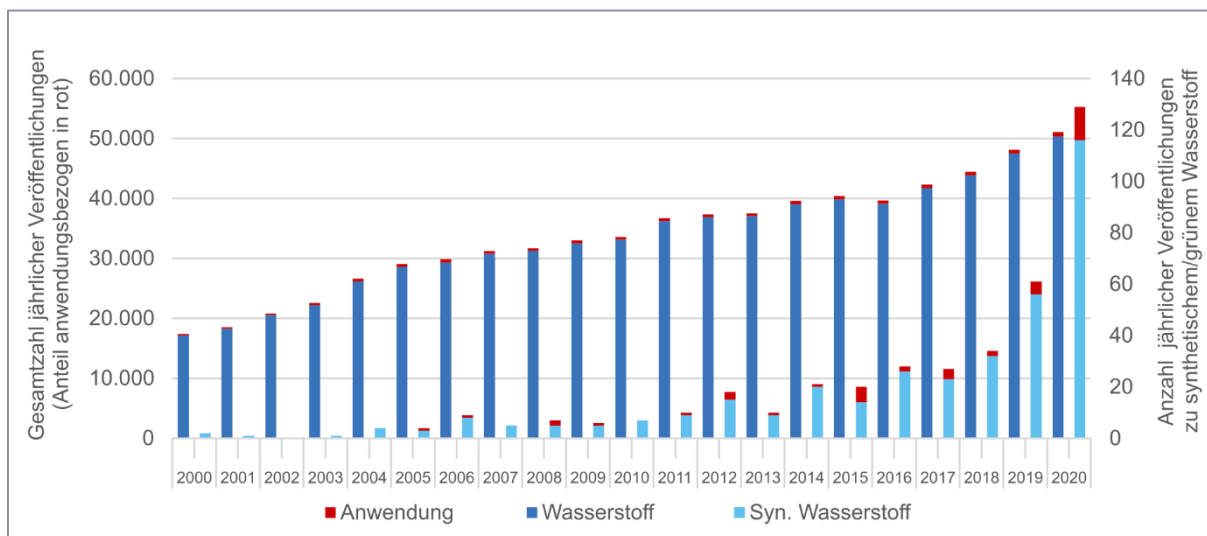
Die Anwendungsintensität von DMC und DME ist mit 0,8 % bzw. 2,3 % eher gering. OME dagegen ist mit 7,8 % Anwendungsintensität schon vergleichbar mit Drop-In-fähigen synthetischen Kraftstoffen.



**Abbildung 7-22:** Anzahl jährliche auf Scopus veröffentlichte Publikationen für OME, DMC und DME. Jeweils gesamt sowie mit Anwendungsbezug Fahrzeug im Vergleich für die Jahre 2000-2020.

Die jährliche Anzahl an Veröffentlichungen mit Bezug auf Wasserstoff hat sich von 17.000 im Jahr 2000 auf über 51.000 im Jahr 2020 etwa verdreifacht liegt damit aber leicht unter dem allgemeinen Trend der Scopus-Veröffentlichungen. Im Vergleich über die zwei zurückliegenden Dekaden lag der Anstieg an Publikationen bei 53 %. Dieser im Mittel etwas geringere Anstieg lässt sich anhand von Abbildung 7-23 erklären. Während die Anzahl an Publikationen zu Beginn der Nullerjahre und zum Ende der Zehnerjahre stark anstieg, war der Zuwachs an Publikationen zwischenzeitlich weniger stark. Die Anzahl an Veröffentlichungen zu synthetischem oder grünem Wasserstoff dagegen stieg zwischen den beiden Dekaden um über 500 % von 39 Publikationen in den Nullerjahren auf 236 Veröffentlichungen in der letzten Dekade. Vergleicht man die Jahre von 2001-2010 mit 2011-2020, so liegt die Wachstumsrate sogar bei über 700 %. Dies lässt sich ebenfalls deutlich in Abbildung 7-23 erkennen, bei der die als Veröffentlichungen zum synthetischen Wasserstoff identifizierten Publikationen in hellblau auf der zweiten Y-Achse dargestellt sind.

Während die Anwendungsintensität bei Wasserstoff mit 1,4 % vergleichbar mit der von Ethanol und Methan ist, liegt die Anwendungsintensität von synthetischem Wasserstoff mit 10,6 % im Bereich der Drop-In-fähigen synthetischen Kraftstoffe. In absoluten Zahlen zeigt sich ein Anstieg an Veröffentlichungen, die der Fahrzeuganwendung mit Wasserstoff zugeschrieben werden konnten (von 3.950 auf 5.094 sowie von 5 auf 25 für synthetischen Wasserstoff).



**Abbildung 7-23:** Anzahl jährliche auf Scopus veröffentlichte Publikationen für Wasserstoff und synthetischen bzw. grünen Wasserstoff. Jeweils gesamt sowie mit Anwendungsbezug Fahrzeug im Vergleich für die Jahre 2000-2020.

### **Benchmark internationaler Forschungsaktivitäten**

Die Analyse der internationalen Forschungsaktivitäten in Bezug auf synthetische Kraftstoffe wird im Folgenden erläutert im Vergleich der anwendungsorientierten Veröffentlichungen von Ethanol, Methanol, Methan und Wasserstoff.

Da im Scopus-Datensatz keine eindeutige Information zum Herkunftsland der Veröffentlichung, sondern lediglich zur jeweiligen „Affiliation“ (Zugehörigkeit) gegeben ist, wurde das

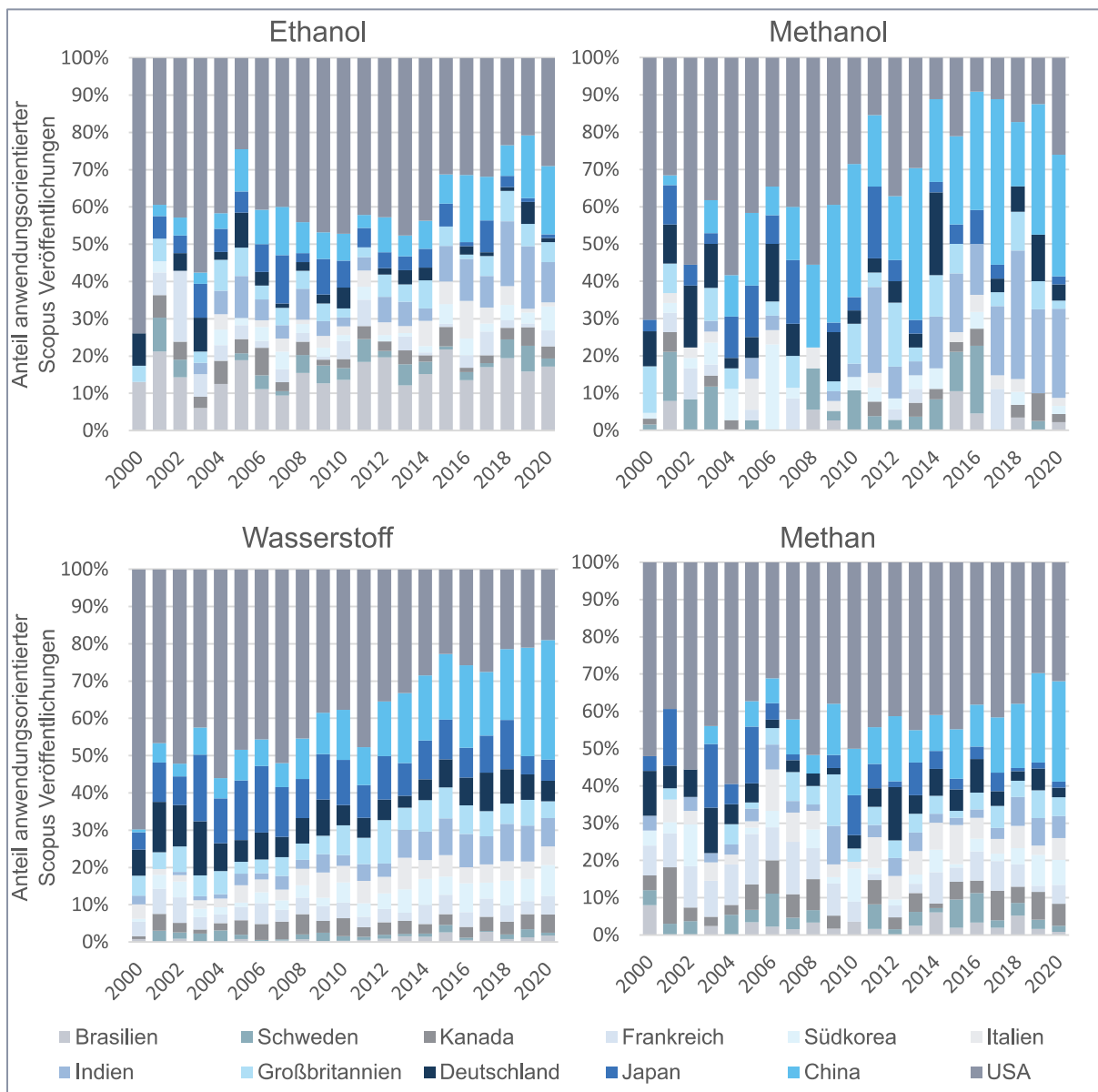
Herkunftsland über einen Textfilter auf Basis der „Affiliation“-Spalte abgeleitet. Auf diese Weise wird das Herkunftsland „Canada“ aus der Zugehörigkeit: „School of Engineering, University of Guelph, Guelph, ON, Canada“ abgeleitet. Eine Veröffentlichung wird somit auch bei mehreren beteiligten Instituten jeweils nur dem Herkunftsland der Zugehörigkeit des Erstautors zugeordnet. Dabei ist darauf hinzuweisen, dass aufgrund dieser Filterung die Anzahl der identifizierten Veröffentlichungen nicht immer vollständig einem Land zugeordnet werden können.

Im Zuge der Analyse wurden die Länder USA, China, Japan, Deutschland, Großbritannien, Indien, Italien, Südkorea, Frankreich, Kanada, Schweden und Brasilien als Hauptakteure in Bezug auf die Veröffentlichung von anwendungsbezogenen Publikationen zu synthetischen Kraftstoffen identifiziert. Die Reihenfolge dieser 12 Länder wurde basierend auf der Anzahl an anwendungsorientierten Veröffentlichungen für Wasserstoff festgelegt. Die insgesamt über 15.611 Publikationen können zu über zwei Dritteln den aufgelisteten Ländern zugeordnet werden. Abbildung 7-24 stellt die Verteilung der Veröffentlichungen aus den betrachteten Ländern über den Zeitraum von 2000 bis 2020 dar.

Insgesamt ist eine Verschiebung der geographischen Schwerpunkte anwendungsorientierter Veröffentlichungen zu erkennen. In den Nullerjahren dominiert die USA die anwendungsorientierten Veröffentlichungen bei allen betrachteten Kraftstoffen mit einem Anteil von etwa 50 %. Mit dem Anfang der Nullerjahre lässt sich allerdings ebenfalls ein Anstieg an Veröffentlichungen beobachten, welche chinesischen Einrichtungen zugeschrieben werden können. Im Jahr 2020 übersteigt vor allem bei Methanol (33 % Publikationen aus China zu 26 % Publikationen aus den USA), aber auch bei Veröffentlichungen zum Thema Wasserstoff (32 % zu 19 %), der Anteil an chinesischen Veröffentlichungen den der USA.

Der drittgrößte Player nach den USA und China ist je nach betrachtetem Kraftstoff unterschiedlich. Bei Veröffentlichungen zum Thema Wasserstoff folgt Japan mit einer Summe aus knapp 700 anwendungsorientierten Publikationen den USA (Anzahl identifizierte Publikationen: 2.335) und China (Anzahl identifizierte Publikationen: 1.015) über die Jahre 2000 bis 2020. Gefolgt von Deutschland mit 474 Veröffentlichungen im gleichen Zeitraum.

Bei Ethanol liegt China zwar im Jahr 2020 anteilig vor Brasilien, in Summe über die Jahre 2000 bis 2020 können Brasilien allerdings mit 270 zu 160 Veröffentlichungen deutlich mehr anwendungsorientierte Publikationen zugeordnet werden als China. Auf Platz vier folgt Indien mit insgesamt 127 Veröffentlichungen zu Ethanol mit Anwendungsbezug.



**Abbildung 7-24:** Benchmark der F&E-Anteile bei anwendungsorientierten Scopus-Veröffentlichungen im Bereich Ethanol, Methanol, Methan und Wasserstoff im internationalen Vergleich, 2000-2020

Neben China verzeichnet Indien ebenfalls einen Anstieg an anwendungsorientierten Publikationen zu Methanol im Zeitraum der letzten Dekade. Nach den USA mit 246 und China mit 140, folgt nun Indien an dritter Stelle mit 65 Veröffentlichungen im Zeitraum von 2000 bis 2020. Deutschland liegt bei Publikationen zum Thema Methanol an vierter Stelle mit 58 anwendungsorientierten Veröffentlichungen im gleichen Zeitraum.

In Bezug auf die jährlichen Publikationszahlen zu Methan hat China bereits fast zu den USA aufgeschlossen. Hinsichtlich der Gesamtzahl an Veröffentlichungen zu Methan in den Jahren 2000 bis 2020 folgt Frankreich den USA und China an dritter Stelle mit 96 anwendungsbezogenen Veröffentlichungen (USA: 589, China: 185).

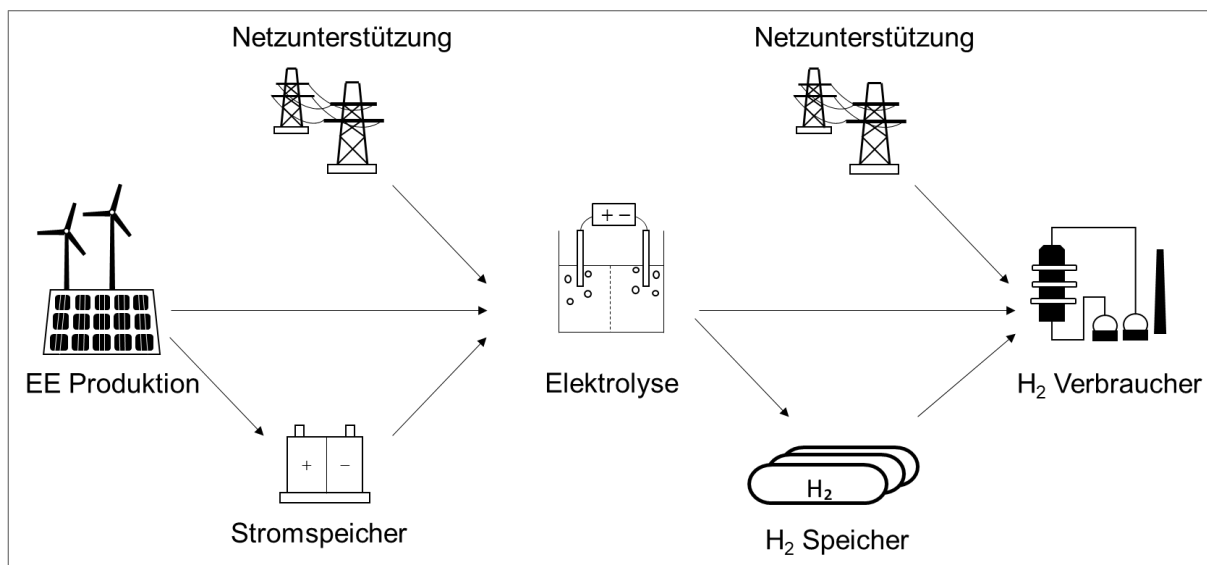
## 7.2 Techno-ökonomische und ökologische Bewertung generischer Kraftstoffpfade bei Herstellung im Ausland

Da die Produktion von erneuerbaren Kraftstoffen ein sehr energieintensiver Prozess mit geringem Wirkungsgrad ist, wird die Produktionskapazität in Deutschland nicht den Bedarf decken können. Perspektivisch müssen erneuerbare Kraftstoffe daher importiert werden, wie es heute mit fossilen Treibstoffen bereits der Fall ist. Aus diesem Grund werden techno-ökonomische und ökologische Analysen von großskaligen Kraftstoffproduktionsanlagen an mehreren Standorten im Ausland mit evaluiert und mit einem Standort in Deutschland verglichen. Die betrachteten Standorte sind:

- Chile, Pampa Anita (Atacama Wüste)
- Chile, Punta Arenas (Patagonien)
- Spanien, Almeria (Andalusien)
- Australien, Northampton (Western Australia)
- Deutschland, Stötten (Baden-Württemberg)

Die Bilanzgrenze der betrachteten Kraftstoffproduktionsanlagen ist in Abbildung 7-25 dargestellt. Auf Basis der Wetterdaten (für Chile [Pfenninger und Staffell 2016a, 2016b], für Deutschland [DWD]) wird das EE-Produktionspotenzial ermittelt. Der H<sub>2</sub>-Verbraucher ist die eigentliche Synthesanlage, in welcher Wasserstoff umgewandelt und die Kraftstoffe hergestellt werden. Die jeweiligen Speicher, die Größe der Elektrolyse sowie die PV- und Windkraft-Anlagen sind überdimensioniert, so dass der H<sub>2</sub>-Verbraucher für 8.000 Stunden im Jahr mit einem konstanten Wasserstoffmassenstrom versorgt wird und kontinuierlich Kraftstoffe produzieren kann. Die Methodik, inwiefern welche Komponenten zu welchem Maße überdimensioniert werden, ist in [Raab et al. 2022] publiziert und bildet den zeitlichen Verlauf der Anlage mit einer Auflösung von einer Stunde ab. Länderspezifische Werte für die PV- und Windkraft-Anlagen werden der Literatur entnommen [IRENA 2021], Stromspeicher basieren auf [Jülch 2016], Wasserstoffspeicher auf [Abdin et al. 2021].

Der hier verwendete Ansatz stellt einen Extremfall dar, bei welchem die Dynamik zu 100 % von der Wasserstoffbereitstellung abgedeckt wird, um die Synthese konstant zu fahren. Ansätze mit einer dynamischen Synthese sind ebenso möglich, wurden jedoch nicht betrachtet.



**Abbildung 7-25:** Bilanzraum der Kraftstoffproduktionsanlage [Raab et al. 2022]

Für die Standortanalysen wird angenommen, dass der H<sub>2</sub>-Verbraucher eine Methanolsynthese ist, die mit einem konstanten Wasserstoffmassenstrom von 5 t/h versorgt wird. Als Elektrolyse wird die alkalische Elektrolyse mit 2030 als Referenzjahr verwendet. Die Netzunterstützung bei der Elektrolyse beträgt 10 %, d.h. dass die maximale elektrische Leistung, die für die Elektrolyse aus dem Netz bezogen wird, ausreicht um 0.5 t/h an Wasserstoff zu produzieren. Die Methanolsynthese wird zum Teil mit überschüssigem elektrischem Strom aus den PV- und Windkraft-Anlagen versorgt, der restliche elektrische Energiebedarf wird durch Netzstrom gedeckt.

Die technischen Ergebnisse der Standortanalysen sind in Tabelle 7-3 gelistet und die Ergebnisse der nachgeschalteten Synthese. Als Vergleichswert, mit dem Wirkungsgrad von 48 kWh<sub>el</sub>/kg<sub>H<sub>2</sub></sub> der alkalischen Elektrolyse für das Jahr 2030 und dem erforderlichen Wasserstoffmassenstrom von 5 t/h ergibt sich eine minimale Elektrolysekapazität von 240 MW.

**Tabelle 7-3:** Technische Ergebnisse der H<sub>2</sub> Bereitstellung der Standortanalysen

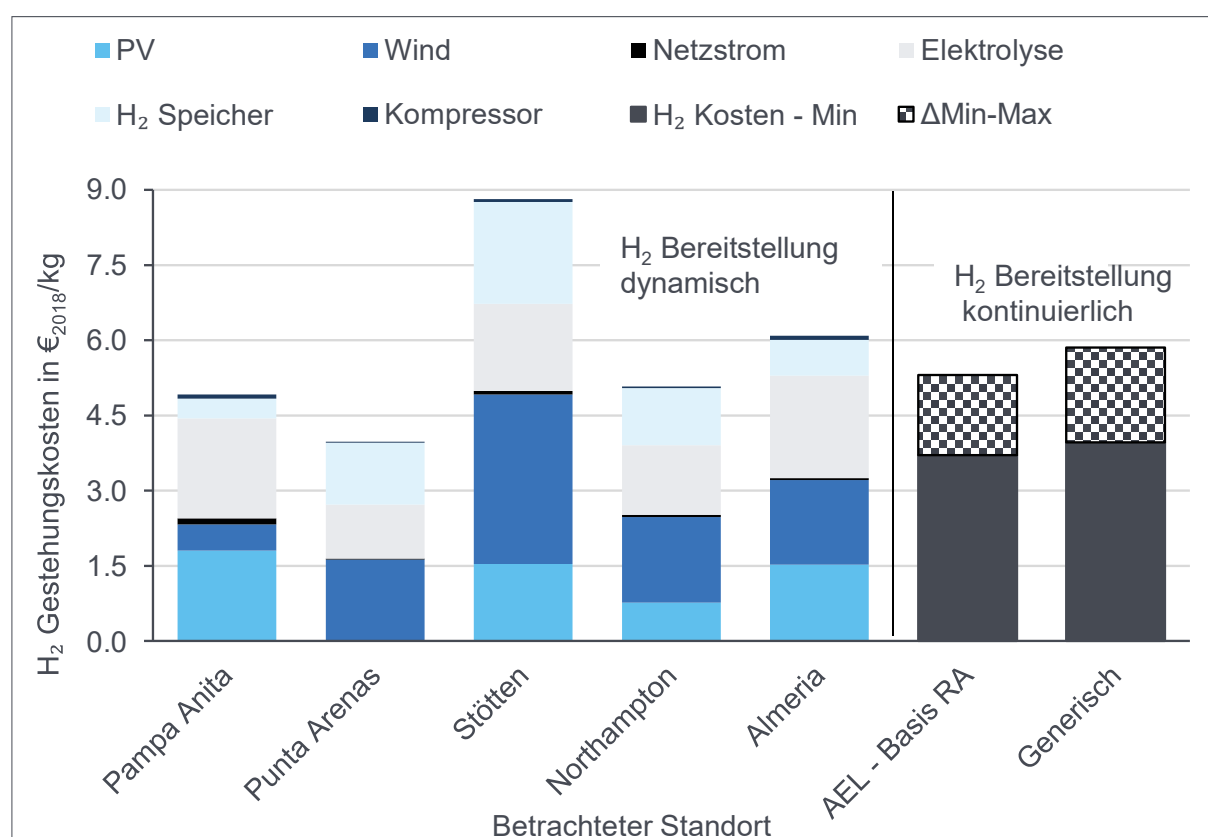
Komponente	Einheit	Pampa Anita	Punta Arenas	Almeria	Northampton	Stötten
PV	10 <sup>3</sup> m <sup>2</sup>	3335,4	0	3636,8	1272,8	4437,3
Windkraftanlagen*	-	57	178	165	151	330
Elektrolysekapazität	MW	585,4	316,9	523,9	355,9	445,3
H <sub>2</sub> Speicher	t	99,82	313,98	144,3	230,7	411,14
Netzstrombedarf Elektrolyse	GWh/a	56,9	9,1	21,8	9,1	28,7



Komponente	Einheit	Pampa Anita	Punta Arenas	Almeria	Northampton	Stötten
Netzstrombedarf Methanolsynthese	GWh/a	278,5	101,4	229,6	157,6	204,3

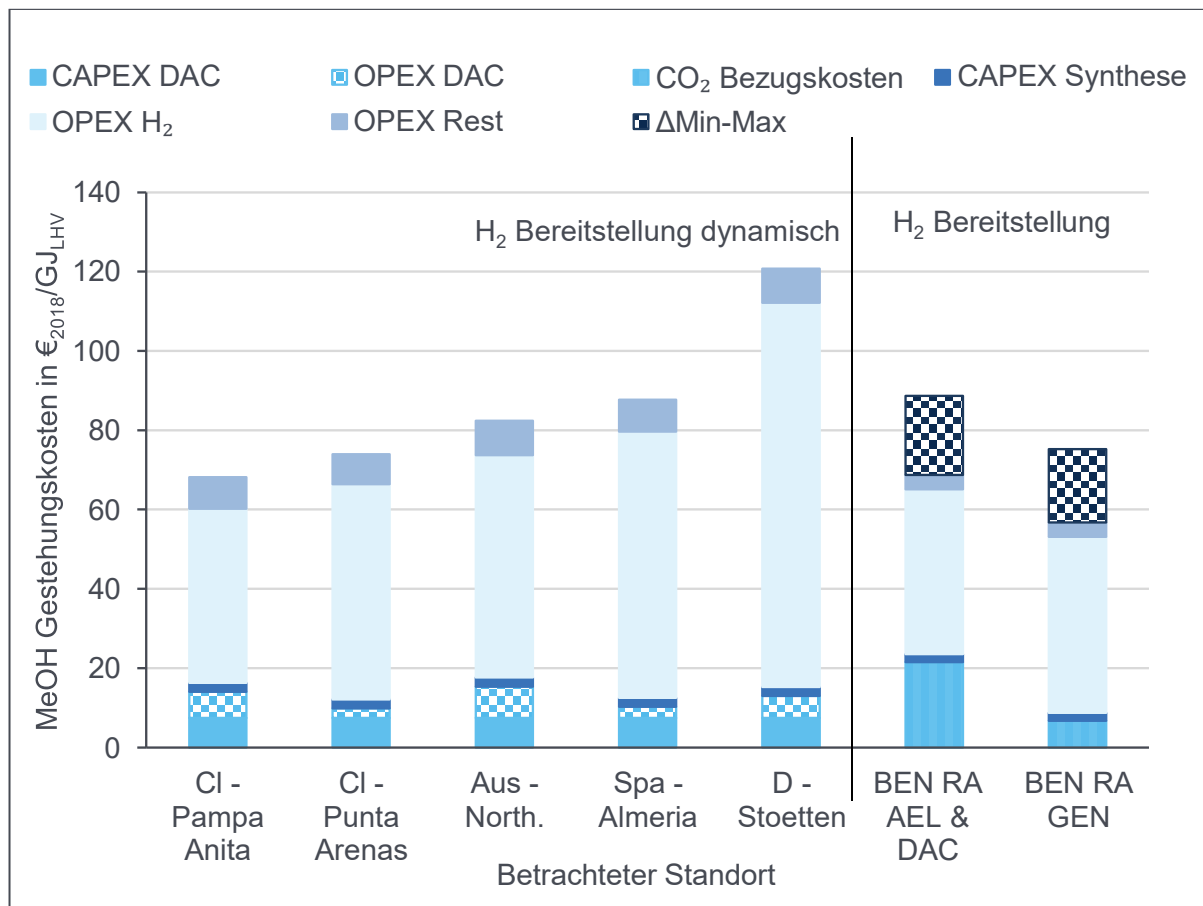
\*GE Windkraftanlagen mit einer Kapazität von 2.5 MW dienen als Referenzgröße

Auf Basis dieser Ergebnisse, ergeben sich die in Abbildung 7-26 dargestellten Kosten für Wasserstoff. Als zusätzlicher Vergleichswert sind die Wasserstoffgestehungskosten per alkalischer Elektrolyse auf Basis der BEniVer-Rahmenannahmen mit dargestellt. Bei letzterem ergibt sich die Spanne aus den minimalen und maximalen Stromkosten.



**Abbildung 7-26:** Wasserstoffgestehungskosten auf Basis der Standortanalysen

Das für die Synthese erforderliche CO<sub>2</sub> wird per DAC zur Verfügung gestellt. Der Wärmebedarf der DAC wird zum Teil durch die Abwärme der exothermen Reaktion gedeckt, die restliche Energie wird elektrisch bereitgestellt. Die Kosten für Methanol an den jeweiligen Standorten sind in Abbildung 7-27 mit Vergleichsergebnissen auf Basis der Rahmenannahmen (BEN RA) dargestellt. Bei „BEN RA – AEL & DAC“ wird die DAC und die alkalische Elektrolyse zur Bereitstellung der Eduktgase verwendet, bei „BEN RA – GEN“ wird generisches CO<sub>2</sub> und H<sub>2</sub> verwendet.



**Abbildung 7-27:** Standortanalyse der Methanolgestehungskosten für das Jahr 2030

In Abbildung 7-27 wird bei den Kosten der Standortanalysen zwischen den CAPEX und OPEX der DAC unterschieden, während bei den Kosten auf Basis der Rahmenannahmen nur die reinen Kosten des CO<sub>2</sub> angegeben sind. Generell ist ersichtlich, dass die Investitionsausgaben für die eigentliche Synthese eine untergeordnete Rolle spielen. Der Aspekt „ΔMin-Max“ bei den Vergleichsergebnissen gibt den Kostenaufschlag an, welcher sich durch die Abgaben aus Unterkapitel 2.2.3 ergibt.

Des Weiteren ist aus Abbildung 7-27 ersichtlich, dass die Kosten der Produktion im Ausland nicht unbedingt günstiger sind als die Produktionskosten in Deutschland auf Basis der BE尼Ver Rahmenannahmen. Dies gilt, wenn die Steuern und Abgaben beim Bezug des Stroms für PtX-Anlagen geringgehalten werden. Allerdings wird an dieser Stelle darauf hingewiesen, dass hierbei unterschiedliche Annahmen beim Bezug des Stroms getroffen wurden. Aus diesem Grund sind zusätzlich die Stromkosten in Tabelle 7-4 aufgelistet, welche sich im Ausland auf Basis des in Abbildung 7-25 abgebildeten Systems ergeben. Dabei wird zwischen den reinen Stromgestehungskosten und den sich rechnerisch, durchschnittlich genutzten Stromkosten unterschieden (EE – genutzt). Nicht 100 % des erzeugten Stroms kann genutzt werden, so muss beispielsweise der Mittagspeak bei der Bereitstellung über PV abgeregelt werden.

**Tabelle 7-4:** Stromgestehungskosten aus den Standortanalysen

LCOE [€/MWh]	PV	Wind	EE - genutzt	Netzstrom
<b>Pampa Anita</b>	40.7	55.6	51.0	92.9
<b>Punta Arenas</b>	-	23.1	34.2	92.9
<b>Almeria</b>	41.7	52.0	67.7	70.5
<b>Northampton</b>	52.7	33.3	52.4	198.0
<b>Stötten</b>	59.0	59.3	103.9	99.4
<b>BEN - RA</b>	-	-		66.1 / 99.4

### 7.3 Verbundvorhaben MENA-Fuels zur Bewertung der Rolle der MENA-Region für die Versorgung von Deutschland mit grünem Wasserstoff und seinen Folgeprodukten

Je nach Antriebsszenario stellt sich die Frage, woher und zu welchen Kosten der Bedarf an Strom aus erneuerbaren Energien (EE), Wasserstoff und seinen synthetischen Folgeprodukten in Deutschland und Europa gedeckt werden könnte. Da die Stromerzeugung aus EE ca. 50 % ihrer gesamten Herstellungskosten ausmacht, stellt die Herkunft der EE eine Schlüsselgröße dar. MENA-Fuels, als weiteres Verbundvorhaben aus der Forschungsinitiative Energiewende im Verkehr (EiV), hat diese Frage aufgegriffen und untersucht, welche Rolle der MENA-Region (Middle East/North Africa) dabei zukommen könnte. Im Folgenden werden ausgewählte, zentrale Ergebnisse vorgestellt<sup>23</sup>.

In der MENA-Region sind mit ca. 413.000 TWh/a **sehr große Erzeugungspotenziale** an EE vorhanden, insbesondere bei der Nutzung von Solarenergie (PV, CSP). Entsprechend sind auch die Potenziale zur Herstellung von Wasserstoff und synthetischen Kraftstoffen sehr groß, selbst nach Abzug des langfristigen Eigenbedarfs der MENA-Region für eine komplette Umstellung auf EE. Verglichen mit dem möglichen Bedarf an synthetischen Kraftstoffen in Europa im Jahr 2050, bei einer breiten Variation der Antriebstechnologien, liegen die möglichen Exportpotenziale um den Faktor 10 (aus Wind) bis Faktor 210 (aus Solar) höher. Betrachtet man nur die Versorgung Deutschlands, sind die Faktoren noch einmal um das 5,6-fache höher.

Eine zentrale Voraussetzung für Importe aus der MENA-Region ist jedoch, dass die Erneuerbaren Energien dort zunächst primär für die Eigenversorgung stark ausgebaut werden müssen. Schon eine **THG-neutrale Energieversorgung der MENA-Länder** ohne fossile Energieträger wird bereits eine enorme Herausforderung darstellen. Der geschätzte erforderliche Ausbau an Erzeugungskapazitäten für Solar- und Windstrom liegt, je nach Szenario, bei insgesamt

<sup>23</sup> Die 14 Teilberichte inklusive eines Syntheseberichts sind auf der website [www.wupperinst.org/MENA-Fuels/](http://www.wupperinst.org/MENA-Fuels/) zu finden.

4.500 GW bis knapp 9.000 GW bis zum Jahr 2050. Ein zusätzlicher Ausbau der EE-Stromerzeugung in der MENA-Region für den Export von synthetischen Kraftstoffen sollte nicht auf Kosten der eigenen Energietransformation gehen, da sonst die globalen Ziele konterkariert würden.

Auch wenn die Potenziale an EE unterschiedlich verteilt sind, weisen nahezu alle MENA-Länder und -Regionen bedeutende Erzeugungspotenziale mit **geringen Gesteungskosten** auf. In den günstigsten Standorten liegen die PtL-Gesteungskosten – gerechnet bei mittleren Investitionskosten – im Jahr 2030 bei 1,92 – 2,65 €/L und im Jahr 2050 bei 1,22 – 1,65 €/L (eine positive Entwicklung von Investitionsbedingungen in der Region vorausgesetzt). Das Exportpotenzial von Kraftstoffen, die für unter 2 €/L hergestellt werden können, beläuft sich selbst bei negativer Entwicklung von Investitionsbedingungen im Jahr 2050 auf ca. 26.000 TWh/a. Bei positiver Entwicklung von Investitionsbedingungen beläuft sich dieses sogar auf ca. 48.000 TWh/a.

Die Analyse zeigt jedoch auch auf, dass in der Bewertung möglicher Exportpotenziale aus der MENA-Region nicht nur das kostengünstigste EE-Potenzial, sondern auch das **Investitionsumfeld entscheidend** ist. Die Berücksichtigung von Investitionsrisiken in den Ländern der MENA-Region hat einen signifikanten Einfluss auf die Kosten des Wasserstoffs und seiner Folgeprodukte und damit auf die Auswahl der potenziellen Exportländer. Die Risiken wurden dabei für 17 Länder bewertet und als länderspezifisch gewichtete durchschnittliche Kapitalkosten (WACC) umgesetzt. Um mittelfristig auch den Export aus Ländern mit kostengünstigen Potenzialen, aber hohen Risikokosten zu ermöglichen, müssten die Risiken für den erneuerbaren Energiesektor und den synthetischen Kraftstoffsektor durch verschiedene Maßnahmen reduziert werden.

Während die bisher dargestellten Ergebnisse der Energiemodelle rein auf der Analyse von Gesteungskosten basieren, bezieht das **parallel entwickelte Handelsmodell** zusätzlich Handelsbeschränkungen (Embargos) und Zölle mit ein und analysiert zudem eine Vielzahl weiterer Länder außerhalb der MENA-Region. Auch das Handelsmodell kommt zum Schluss, dass MENA-Länder trotz geringer Erzeugungskosten und sehr großer Exportpotenziale nur dann interessante Partner für Deutschland oder die EU werden würden, wenn die Kapitalkosten für Investoren ein Niveau erreichen, das zu einem wirklichen Wettbewerbsvorteil führt. Ansonsten könnte sich die EU einerseits weitgehend selbst versorgen, andererseits würden bei globaler Öffnung und Verfügbarkeit Länder in Amerika und Ozeanien als Handelspartner für die EU eine zunehmend wichtige Rolle spielen.

Für die exemplarisch erstellten **Ökobilanzen von PtL-Prozessketten** zur Herstellung synthetischen Kerosins über die Fischer-Tropsch- sowie über die Methanolroute weist der synthetische Kraftstoff eine deutlich geringere Klimawirkung auf als die fossile Referenz. Im Fall, dass das für die Synthese benötigte CO<sub>2</sub> vorher aus der Atmosphäre abgetrennt wurde, kann bilanziell eine Minderung von Treibhausgasen – je nach Technologie und Produktionsland – um 57 - 84 % erreicht werden. In allen anderen bilanzierten Umweltwirkungskategorien schneiden die betrachteten Pfade dagegen schlechter ab. Dies gilt beispielsweise für die Indikatoren Landnutzung, terrestrische Versauerung, Eutrophierung und den kumulierten Energieaufwand. Es empfiehlt sich zudem, über große Entfernungen nicht den benötigten Wasserstoff,

sondern den produzierten Kraftstoff zu transportieren. So können Diffusionsverluste des Wasserstoffs reduziert und Synergieeffekte einer Wärme- und Wasserintegration der verschiedenen Teilprozesse genutzt werden.

## 8 Akzeptanz

Ziel der Akzeptanzforschung in BEniVer ist eine differenzierte Darstellung (inkl. Kategorisierung und Gewichtung) relevanter Akzeptanzfaktoren in den Feldern Markt-, sozio-politischer und lokaler Akzeptanz sowie die Darstellung möglicher Handlungsoptionen zu einer gesellschaftlich akzeptablen Technologieentwicklung von synthetischen Kraftstoffen. Um diese Erkenntnisse zu gewinnen, wurden die Methoden der Akteursanalyse und der Medienanalyse, Befragungen mittels Online-Fragebögen und teilstrukturierten Interviews sowie Gruppendiskussionen und Stated Choice Experimente eingesetzt. Weiterhin wurden Daten aus Fahrten- bzw. Tankbuchführungen ausgewertet.

Die Akzeptanzforschung erfolgte dabei vor dem Hintergrund der Annahme, dass **synthetische Kraftstoffe als soziotechnische Innovation in einem gesellschaftlichen Mehrebenensystem** zu betrachten sind (vgl. Abb. 8-1). Der gesellschaftliche Diskurs und die Akzeptanzbildung werden von unterschiedlichen Akteursgruppen beeinflusst, die jeweils spezifische Rollen bzw. Funktionen einnehmen. Beim Untersuchungsdesign wurde ein besonderer Fokus auf Schnittstellen-Akteure gerichtet, die durch ihre Einstellung zu synthetischen Kraftstoffen und ihre Kommunikation zum Thema auch auf die Meinungsbildung bei potenziellen Endnutzer\*innen einwirken (Medien, Multiplikatoren).

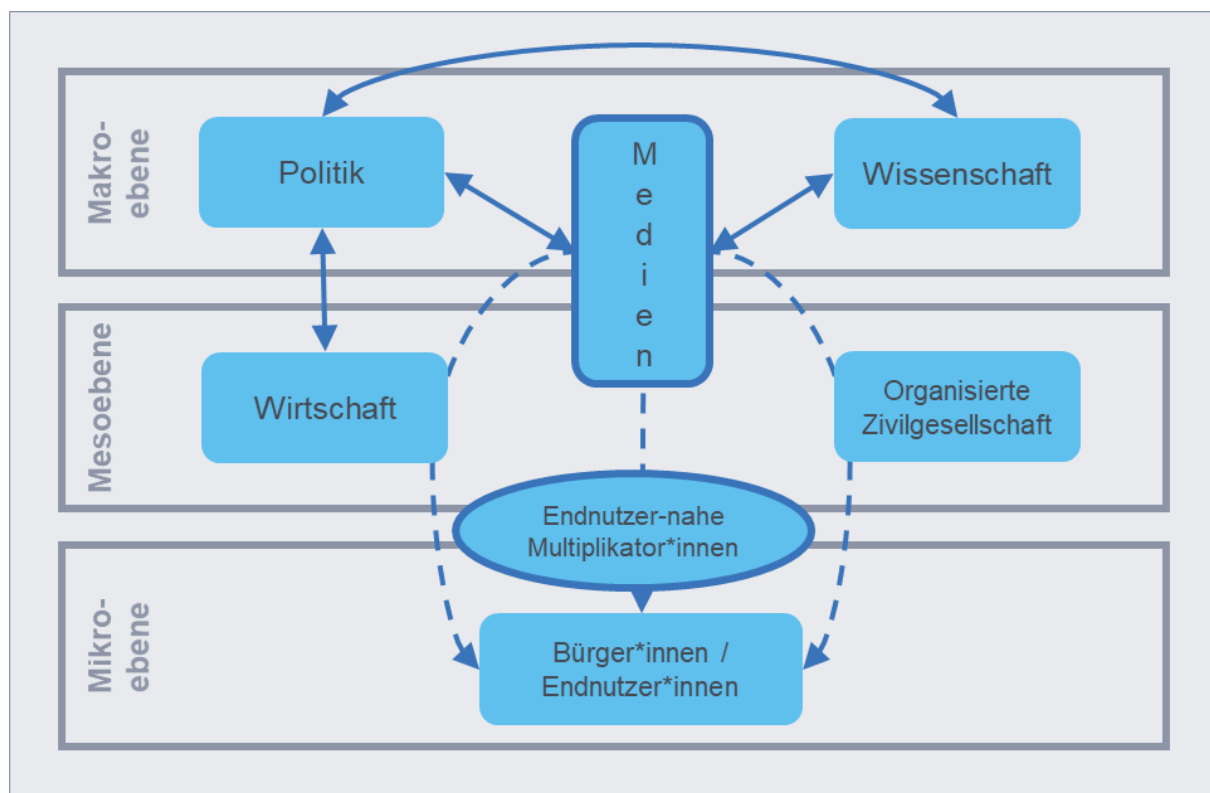


Abbildung 8-1: Betrachtete Akteursgruppen im Mehrebenensystem

## 8.1 Akteursanalyse

Die Grundlage für die Akzeptanzanalysen bildete eine umfassende Akteursanalyse. Entlang der Prozessketten (Erzeugung, Umwandlung, Nutzung) werden direkt und indirekt betroffene bzw. relevante Akteursgruppen identifiziert und anhand qualitativer, leitfadengestützter Interviews hinsichtlich ihrer Rollen (z.B. Multiplikator, Rahmengeber) und Positionen (z.B. unterstützend, hemmend) untersucht und gruppiert. Neben der reinen Identifikation gesellschaftlicher Akteure / Akteursgruppen, die im Zusammenhang mit synthetischen Kraftstoffen aktiv oder passiv in Entscheidungs- und Umsetzungsprozesse involviert sind, soll ein möglichst umfassendes Bild davon entstehen, **welche Akteure / Akteursgruppen für die Akzeptanzbildung gegenüber synthetischen Kraftstoffen in unterschiedlicher Weise relevant sind**. Entweder weil ihre eigene Akzeptanzausprägung (Einstellung gegenüber synthetischen Kraftstoffen) von Bedeutung für die Erfolgsaussichten der Technologie bzw. für die Marktchancen der Kraftstoffe ist (Bsp. Investitionsbereitschaft von wirtschaftlichen Akteuren; Zahlungsbereitschaft von Endkunden), und / oder weil sie durch ihre Tätigkeit / ihr Wirken die Akzeptanzbereitschaft (Einstellung) anderer gesellschaftlicher Gruppen beeinflussen können (z. B. Medien, politische Akteure).

Von Bedeutung sind auch **Beziehungen zwischen Akteuren**, insbesondere (faktische oder potenzielle) Akteursallianzen, d. h. Konstellationen von mehreren Akteuren / Akteursgruppen, die gleiche oder ähnliche Ziele verfolgen und ihre Aktivitäten mit Blick auf diese koordinieren (könnten). Auf diese Weise haben sowohl Befürworter, als auch Kritiker von synthetischen Kraftstoffen die Möglichkeit, einen größeren Einfluss auf die gesellschaftliche Debatte und die Akzeptanzlage auszuüben.

Auf der Grundlage von Daten, die aus der Sichtung von themenbezogenen Studien, Diskussions- und Positionspapieren, Experteninterviews und gezielten Nachrecherchen (in unterschiedlichen Online-Quellen) gewonnen wurden, wurden allgemeine / übergreifende und verkehrsmodusspezifische Akteurskarten erstellt. In diesen werden die identifizierten Akteure im Themenfeld synthetische Kraftstoffe entsprechend ihrer Zugehörigkeit zu unterschiedlichen Akteursgruppen (Wirtschaft / Industrie, Wissenschaft, zivilgesellschaftliche Verbände, Politik) bzw. Untergruppen und Clustern (z.B. Transport & Logistik, Airlines) verortet.

**Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass sich mit Blick auf die Verteilung der identifizierten Akteure auf die Hauptgruppen ein deutliches Ungleichgewicht zeigt.** Die mit Abstand größte Anzahl von Akteuren lässt sich der Gruppe Wirtschaft / Industrie zuordnen. Stark besetzt ist auch die Akteursgruppe Wissenschaft, während die Gruppen der zivilgesellschaftlichen Akteure und der Politik sehr viel geringere Zahlen identifizierter Akteure aufweisen.

Innerhalb der **Gruppe Wirtschaft / Industrie** sind zahlreiche Akteure den Untergruppen Anlagen-, Maschinen- & Motorenbau und Energie-/ Mineralölwirtschaft zuzuordnen. Einen speziellen Akteurs-Cluster an der Schnittstelle dieser Untergruppen stellen Akteure aus der Wasserstoffwirtschaft dar. Als weitere Untergruppen lassen sich die Chemische und Werkstoff-Industrie sowie verkehrsmodusspezifische Akteurskreise beschreiben (Automobilindustrie, Luftfahrtbranche, Schifffahrtsbranche).

In der **Akteursgruppe Wissenschaft** sind überwiegend Universitäts-/ Hochschulinstitute und andere öffentliche / staatliche Forschungseinrichtungen vertreten. Als weitere Untergruppen lassen sich privatwirtschaftliche Institute / Organisationen und Akteure aus dem Bereich Wirtschaftsforschung /-beratung unterscheiden sowie des Weiteren (als forschungsdisziplinärer Cluster) wenige Akteure der Sozial- & Politikwissenschaft(en).

Eine deutlich geringere Anzahl von Akteuren lassen sich den beiden **Gruppen Politik und zivilgesellschaftliche Akteure** zuordnen. Bei den Akteuren der Zivilgesellschaft können die Untergruppen Umweltschutzverbände, Verkehrsclubs und „Grüne“ Think Tanks unterschieden werden. Bei letztgenannter Untergruppe gelingt eine scharfe Abgrenzung zur Akteursgruppe Wissenschaft nur bedingt. Im Feld der politischen und politiknahen Akteure orientiert sich die Einteilung in Untergruppen an den Ebenen des politischen Systems, von der kommunalen Ebene bis zur globalen Ebene.

Aus den Experteninterviews, die im Vorfeld der Akteurskarten-Erstellung geführt wurden, ergaben sich - über Informationen zur Einordnung einzelner Akteure hinaus - u.a. folgende Befunde:

- Es gibt mit Blick auf Power-to-X-Technologien sichtbare Entwicklungen zu einer (weiteren) **Intensivierung von Branchen-übergreifender Vernetzung und Zusammenarbeit**, z.B. zwischen der Energie- und Mineralölwirtschaft, der chemischen Industrie, dem Anlagenbau etc. und mit Forschungspartnern aus dem Wissenschaftsbereich.
- Eine Reihe von Akteuren aus unterschiedlichen Akteursgruppen, vornehmlich aber aus der Wirtschaft und der Wissenschaft sind eingebunden in **Allianzen zur Förderung von PtX-Technologien** (z.B. Power to X -Allianz, Global Alliance Powerfuels)
- Einige Akteure sind vor allem wegen ihrer **Positionierung an Schnittstellen** (z.B. zwischen Politik und Wissenschaft und / oder Wirtschaft, zwischen verschiedenen Wirtschaftsbranchen, zwischen Produzenten und Konsumenten) sehr relevant für die weiteren Entwicklungen bzgl. synthetischer Kraftstoffe; außerhalb des jeweiligen fachlichen Expertenkreises bleiben sie aber als einflussreiche Akteure weitgehend unbeachtet.

## 8.2 Medienanalyse

Im Rahmen einer Medienanalyse wurde untersucht, inwieweit das **Thema synthetische Kraftstoffe im öffentlichen Diskurs** enthalten und wahrnehmbar ist. Die Datengrundlage bildeten 334 Artikel mit mindestens einem enthaltenen Suchbegriff (E-Fuels, strombasierte/ synthetische/ alternative Kraftstoffe), die im Zeitraum 2010 bis 2019 in sechs **überregionalen deutschen Tageszeitungen** erschienen sind (vgl. Tab. 8-1). Dabei wurde zum einen analysiert, in welchem Kontext und mit welchen Verknüpfungen das Thema kommuniziert wird, zum anderen wurden Positionen und Kommunikations- und Argumentationsmuster einzelner Akteure herausgearbeitet. Das Ergebnis ist eine umfassende Darstellung des aktuellen Standes des medialen Diskurses zum Thema synthetische Kraftstoffe und angrenzender Bereiche. Neben dem daraus abzuleitenden Kommunikations- und Informationsbedarf lassen sich hieraus zudem **Rückschlüsse auf die gesellschaftlichen Akzeptanzlagen und relevante Einflussfaktoren** ziehen.

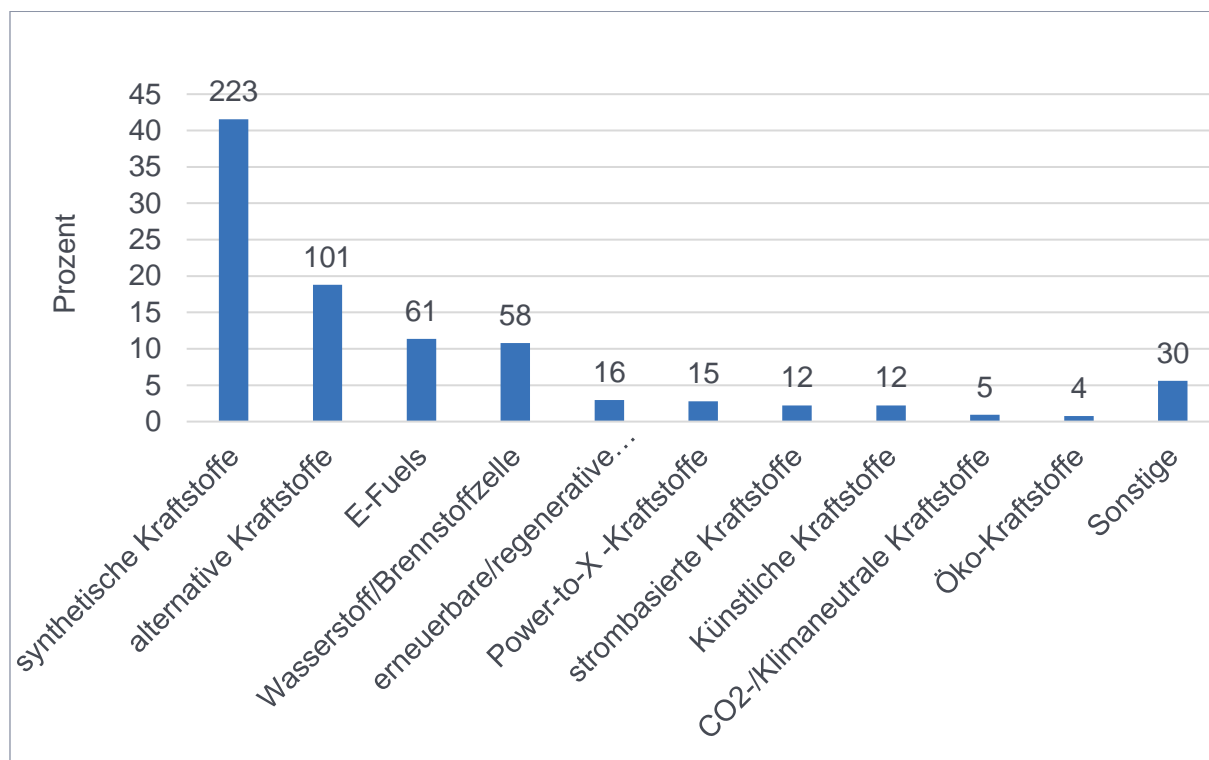
**Tabelle 8-1:** Zeitungstitel, Verlag, Auflagenstärke und Anzahl der in die Auswertung eingeflossener Artikel der sechs überregionalen, deutschen Tageszeitungen

Zeitung	Verlag	Auflagenstärke (verkaufte Auflage)*	Anzahl ausgewerteter Artikel
<b>Süddeutsche Zeitung</b>	Süddeutsche Zeitung GmbH	338.000	33
<b>Frankfurter Allgemeine</b>	Frankfurter Allgemeine Zeitung GmbH	230.000	111
<b>Handelsblatt</b>	Handelsblatt Media Group	135.000	58
<b>Die Welt</b>	Axel Springer SE	119.000	44
<b>Der Tagesspiegel</b>	Verlag Der Tagesspiegel GmbH	109.000	45
<b>Frankfurter Rundschau</b>	Frankfurter Rundschau GmbH	51.000	43

\* Quelle für Auflagenzahlen: [IVW 2022] Zahlen für 1. Quartal 2019, gerundet auf Tausender

Die Untersuchungsergebnisse zeigen, dass der Themenbereich alternative Antriebe in der medialen Berichterstattung zunehmend präsenter wird. Neben Elektromobilität und Wasserstoff-Technologien, werden dabei auch verstärkt synthetische Kraftstoffe angesprochen. **Insbesondere nach 2016 nimmt die Anzahl von Zeitungsartikeln mit Erwähnung synthetischer Kraftstoffe deutlich zu.** Diese Entwicklung scheint sich zu wesentlichen Teilen aus der Intensivierung politisch-öffentlicher Debatten zum Themenfeld Verkehr – Treibhausgase / Klimaschutz – Luftschadstoffe zu erklären (z.B. Klimaschutzplan 2050 der Bundesregierung von 2016, „Dieselaffäre“ ab Ende 2015). Gleichwohl bestehen **noch viele Unsicherheiten und ein damit einhergehender hoher Informationsbedarf.** Neben der generellen Komplexität des Themas ist ein weiterer herausfordernder Kommunikationsaspekt die Begriffsvielfalt hinsichtlich synthetischer Kraftstoffe. Die durchgeführte Medienanalyse illustriert die Bandbreite unterschiedlicher Begriffe in der Berichterstattung.





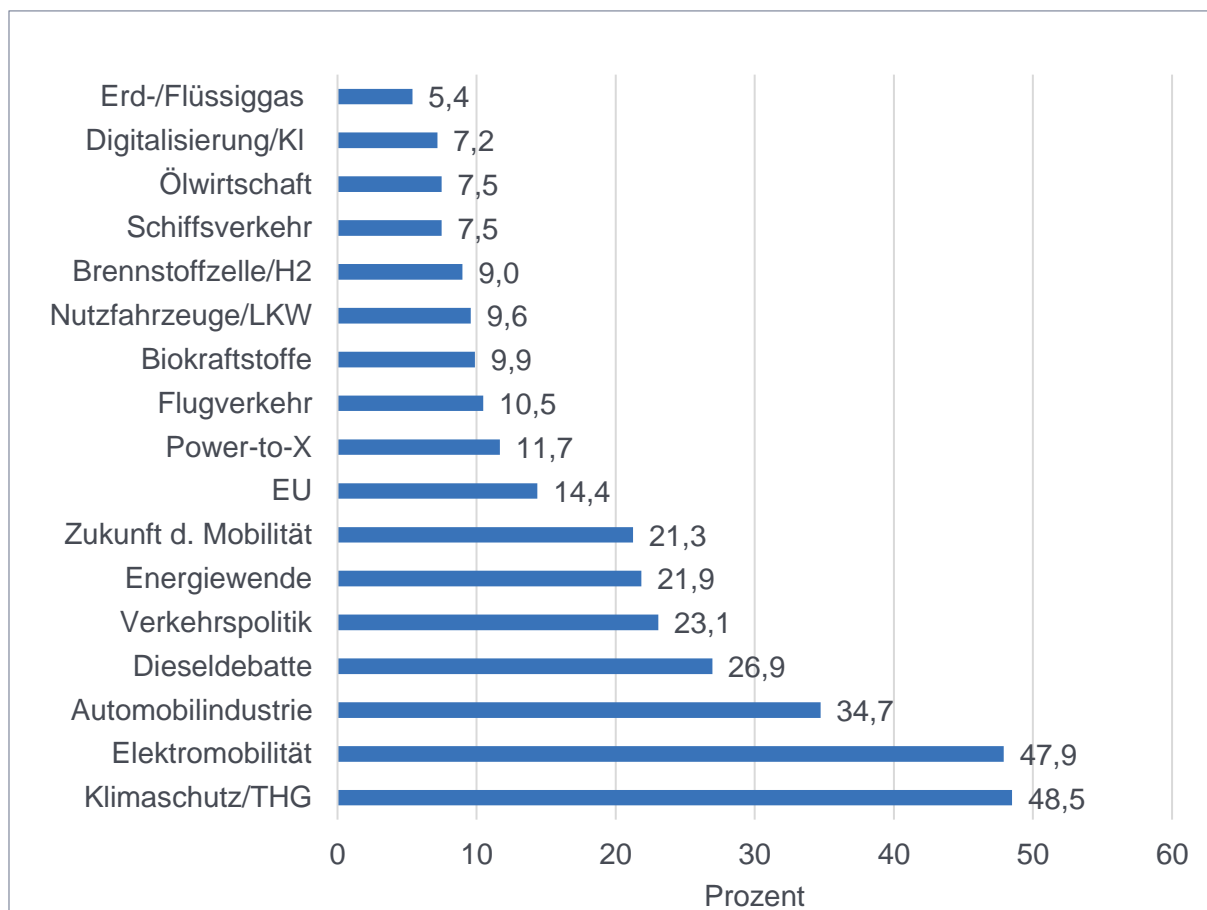
**Abbildung 8-2:** Häufigkeit der Begriffsverwendungen (N= 334 Artikel). Die Zahlen über den Säulen geben die absoluten Nennungen an (in Summe 537 Begriffsennungen)

Am häufigsten wird der Begriff „synthetische Kraftstoffe“ verwendet, ein Terminus mit eher weit gefasstem Bedeutungsinhalt. Am zweithäufigsten findet sich in den Artikeln der Begriff „alternative Kraftstoffe“, der noch weniger präzise eingrenzt, welche Kraftstoffe konkret gemeint sind. An dritter Stelle folgt der enger definierte Begriff „E-Fuels“. Auf den weiteren Plätzen folgen Begriffe, die weniger als 5 % der Gesamtzahl an Begriffsennungen in den Artikeln ausmachen. Darunter sind einerseits Begriffe, die sehr unkonkret sind („erneuerbare / regenerative Kraftstoffe“) und zum Teil auch in fachlich unpräziser, plakativ-vereinfachter Sprache den Gegenstand umschreiben („künstliche Kraftstoffe“, „Öko-Kraftstoffe“). Die 30 Begriffsennungen, die hier unter „Sonstige“ zusammengefasst wurden, setzten sich vor allem zusammen aus Fällen, in denen eine ganz konkrete Kraftstoffsorte genannt wurde (z. B. OME, E-Methanol). Daneben fallen in diese Sammelgruppe nur vereinzelt genutzte Bezeichnungen wie beispielsweise „(Green) Powerfuels“ oder „SynFuels“.

Den Leser\*innen wird durch **fehlende Begriffsdefinitionen und oft ungenügende Differenzierung** nicht immer deutlich, welche Kraftstoffsorten ein im Zeitungsartikel verwendeter Terminus einschließt und welche nicht. Das erschwert in der breiten Öffentlichkeit die Bildung einer klaren Vorstellung davon, worum es sich beispielsweise bei „E-Fuels“ genau handelt und worin sie sich von anderen alternativen Kraftstoffen (etwa den länger bekannten Biokraftstoffen) unterscheiden. **Ziel sollte es dementsprechend sein, eine eindeutige Charakterisierung der strombasierten, synthetischen Kraftstoffe sowie eine konsistente Begriffsverwendung in der medialen Darstellung zu erreichen.**

Einen weiteren zentralen Aspekt der inhaltlichen Medienanalyse stellt die Frage dar, mit welchen anderen Themen(feldern) das Thema synthetische Kraftstoffe zusammen auftritt bzw. in welchen Kontexten synthetische Kraftstoffe als Gegenstand der medialen Berichterstattung im

medialen Diskurs gesetzt werden. **Die kontextuelle Rahmung spielt für die Wahrnehmung und Einordnung eines Themas eine wesentliche Rolle.** Dies sollte auch bei der medialen Kommunikation von synthetischen Kraftstoffen durch die Forschungsinitiative Energiewende im Verkehr berücksichtigt werden.



**Abbildung 8-3:** Kontexte, mit denen das Thema synthetische Kraftstoffe verknüpft wird (dargestellt als prozentualer Anteil der Artikel mit Kontextvorkommen an Gesamtartikelzahl von N=334)

Es gibt zwei Kontexte, die in beinahe jedem zweiten Artikel gemeinsam mit dem Thema synthetische Kraftstoffe vorkommen, nämlich „Klimaschutz / THG“ und „Elektromobilität“. In etwas mehr als jedem dritten Artikel zu synthetischen Kraftstoffen wird zugleich der Kontext „Automobilindustrie“ thematisiert. Mehr als jeder vierte untersuchte Zeitungsbeitrag enthält Aspekte des Kontextes „Dieseldebatte“. Anteilswerte von über 20 % weisen weiterhin noch die Kontexte „Verkehrspolitik“, „Energiewende“ und „Zukunft der Mobilität“ auf. Erkennbar wird hier auch die starke Dominanz des Straßenverkehrs unter den möglichen Anwendungsbereichen für synthetische Kraftstoffe; Flugverkehr und Schiffsverkehr werden in den analysierten Zeitungsbeiträgen aus den Jahren 2010 bis 2019 demgegenüber seltener thematisiert.

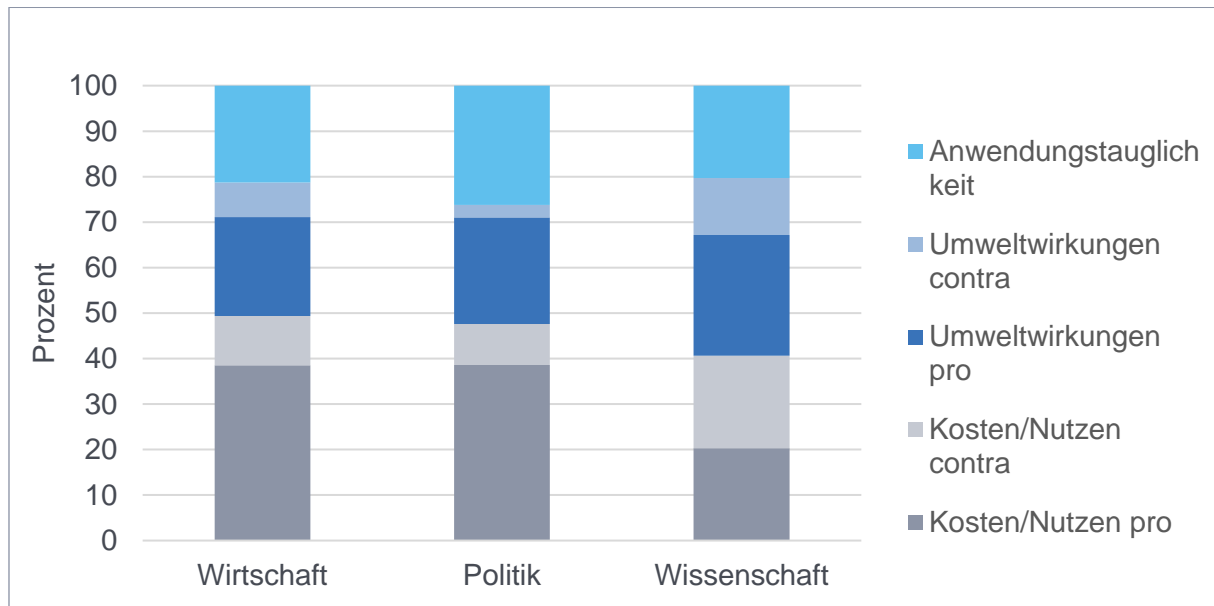
### *Akteursgruppen in den Medien*

Wie sich der mediale Diskurs um synthetische Kraftstoffe gestaltet, wird nicht zuletzt auch davon beeinflusst, wie präsent unterschiedliche Akteursgruppen in den Medien sind. In den analysierten Tageszeitungsbeiträgen ist die Akteursgruppe Wirtschaft mit einem Vorkommen in fast 60 % aller Artikel die präsenteste. Am zweithäufigsten kommt die Akteursgruppe Politik in den Zeitungsartikeln vor, sie ist in gut 37 % der Beiträge vertreten. An dritter Stelle folgt die Akteursgruppe Wissenschaft, die in knapp 13 % der Artikel vorkommt. In rund 5 % der Zeitungsbeiträge werden Vertreter der Akteursgruppe Think Tanks genannt. Die Akteursgruppe NGOs / NPOs tritt in etwa 3,5 % der Artikel in Erscheinung. Circa 8,5 % der Zeitungsbeiträge enthalten Aussagen von bzw. zu in der Kategorie „Sonstiges“ zusammengefassten Akteuren.

**Die Akteurspräsenz in den Zeitungsartikeln spiegelt wider, in welchen Subsystemen oder Funktionsbereichen der Gesellschaft ein Diskurs um das Thema synthetische Kraftstoffe bisher stattfindet.** Es ist bisher ein Themenfeld, das weitgehend innerhalb bestimmter Fachkreise und Gruppen, mit Einfluss auf Abstimmungs- und Entscheidungsprozesse politischer oder ökonomischer Art, debattiert wird. Akteursgruppen, die am ehesten als potenzielle Vertreter der Position von Endnutzern – Verbrauchern / Konsumenten aus der allgemeinen Öffentlichkeit – betrachtet werden können (hier in den Gruppen NGO / NPOs und Sonstige) scheinen sich erst langsam dieses Themas anzunehmen und / oder ihre Meinungen und Ansichten sind bisher weniger gefragt bei der journalistischen Aufbereitung und Vermittlung des Themas.

**Aus der Gesamtheit der Medienbeiträge lässt sich auch eine allgemeine Positionierung der Akteursgruppen bzgl. synthetischen Kraftstoffen herauslesen.** Eine überwiegend positive Einstellung zu synthetischen Kraftstoffen findet man in den Akteursgruppen Wirtschaft, Politik, Wissenschaft und „Sonstige“, in letztgenannter allerdings weniger deutlich ausgeprägt. Eine mehrheitlich uneindeutige bzw. neutrale Positionierung nehmen Akteure aus der Gruppe Think Tanks ein. Überwiegend ablehnend gegenüber synthetischen Kraftstoffen zeigen sich die Meinungen aus der Akteursgruppe NGOs / NPOs.

Abbildung 8-4 bietet für die in den Zeitungsartikeln präsentesten Akteursgruppen Wirtschaft, Politik und Wissenschaft einen Überblick über die **Argumente, die verwendet werden, um die Positionierung pro oder contra synthetische Kraftstoffe zu begründen.** Es handelt sich um eine vereinfachte Darstellung, in der Argumente aggregiert auf Ebene von Argument-Clustern zusammengefasst werden. Man erkennt einige Ähnlichkeiten zwischen Wirtschaft und Politik, was die Verteilung der genutzten Argumente auf die Cluster „Kosten / Nutzen“ (von beiden Gruppen am meisten genutzt), „Umweltwirkungen“ und „Anwendungstauglichkeit“ betrifft. Bei der Akteursgruppe Wissenschaft ist eine etwas andere Verteilung zu erkennen, mit einer stärkeren Nutzung von Argumenten aus dem „Umweltwirkungen“-Cluster. Auffallend ist zudem, dass diese Gruppe häufiger als die anderen beiden Contra-Argumente verwendet, sowohl aus dem Cluster „Umweltwirkungen“, als auch – und mit noch größerem Anteil – aus dem Cluster „Kosten / Nutzen“ (Contra-Argumente kamen im Cluster „Anwendungstauglichkeit“ generell praktisch nicht vor).



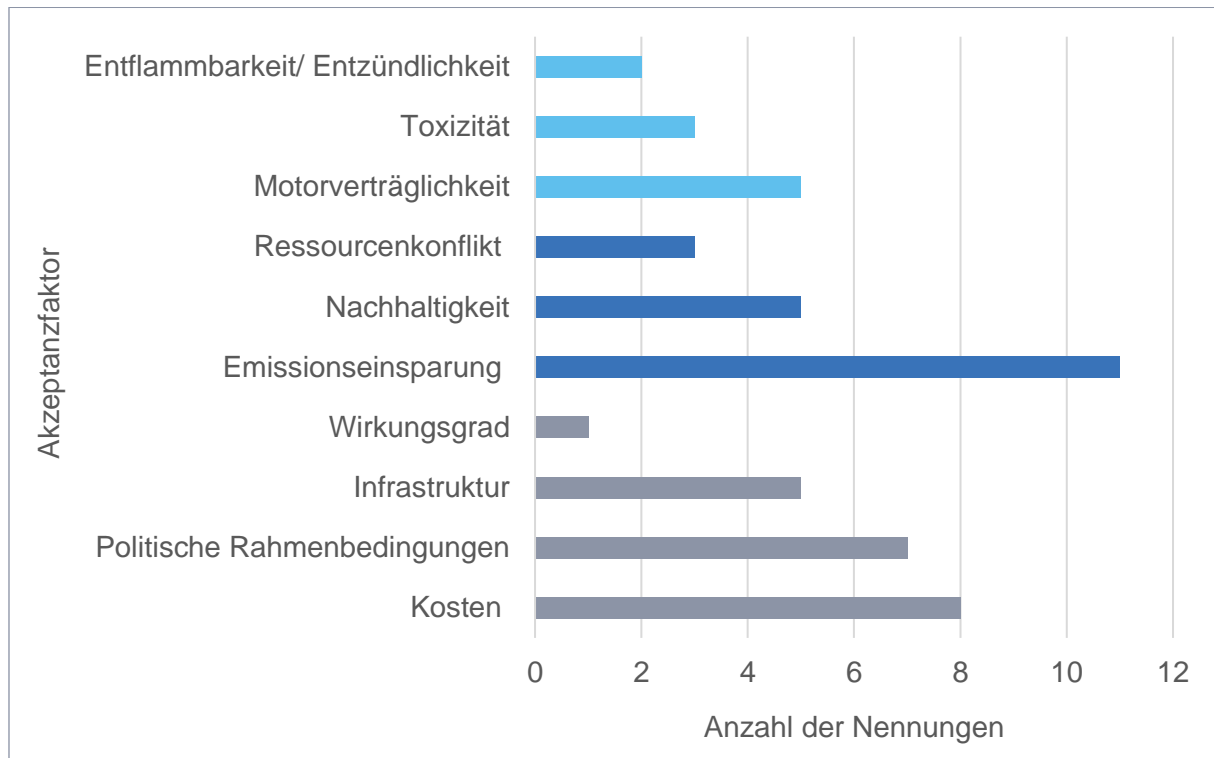
**Abbildung 8-4:** Argumente der Akteursgruppen Wirtschaft, Politik und Wissenschaft pro und contra synthetische Kraftstoffe in analysierten Zeitungsartikeln; nach Clustern geordnet

### 8.3 Akzeptanzfaktoren und Nutzerpräferenzen

#### *Akzeptanzfaktoren*

Die Befunde aus der Akteurs- und der Medienanalyse führten bereits zu ersten Erkenntnissen zu den Faktoren, die für die Akzeptanz bzgl. synthetischer Kraftstoffe von Bedeutung sind. In den Experteninterviews, die im Rahmen der Akteursanalyse durchgeführt wurden, kamen einige Aspekte zur Sprache, welche die Einstellung gegenüber synthetischen Kraftstoffen beeinflussen können. Und die Auswertung von Medienbeiträgen lieferte Einblicke in die Argumentationslinien verschiedener Akteursgruppen, wenn sie Position beziehen zur Frage pro oder contra synthetische Kraftstoffe (vgl. Kap. 8.1 und 8.2), woraus sich ebenfalls Hinweise auf akzeptanzrelevante Faktoren ableiten lassen. Eine weitere Datenquelle zur Identifizierung von Akzeptanzfaktoren stellen die Ergebnisse der zweiten Fragebogenerhebung bei den Projektverbänden dar.

Die Antworten aus den EiV-Verbundprojekten auf die offen formulierte Frage nach zentralen Akzeptanzfaktoren wurden thematisch kategorisiert und ergeben das in Abbildung 8-5 gezeigte Ergebnis:



**Abbildung 8-5:** Von den Verbundprojekten genannte Akzeptanzfaktoren (kategorisierte Antworten), gruppiert nach Anwendung (hellblau), Umwelt (dunkelblau) und Ökonomie (grau)

Die meisten Akzeptanzfaktoren lassen sich den Kategorien Ökonomie (Kosten / Nutzen) und Umwelt zuordnen, Aspekte der Anwendungstauglichkeit werden etwas weniger häufig genannt.

Was die Einschätzungen der Verbundprojekte zur gesellschaftlichen Akzeptanz ihrer spezifischen Kraftstoffe bzw. Kraftstoffpfade angeht, ergibt sich ein zwiegespaltenes Gesamtbild. Sechs Verbundprojekte schätzen die Akzeptanz ihres Kraftstoffs / Kraftstoffpfads als niedrig bis mäßig hoch ein, acht Verbundprojekte schätzen sie als hoch bis sehr hoch ein, ein Verbundprojekt geht von mittlerer Akzeptanz für seinen Kraftstoff/ -pfad aus. Somit kann insgesamt von einer vorsichtig optimistischen Einschätzung gesprochen werden; bei allen Unsicherheiten, mit welchen eine solche prospektive Akzeptanzabschätzung verbunden ist.

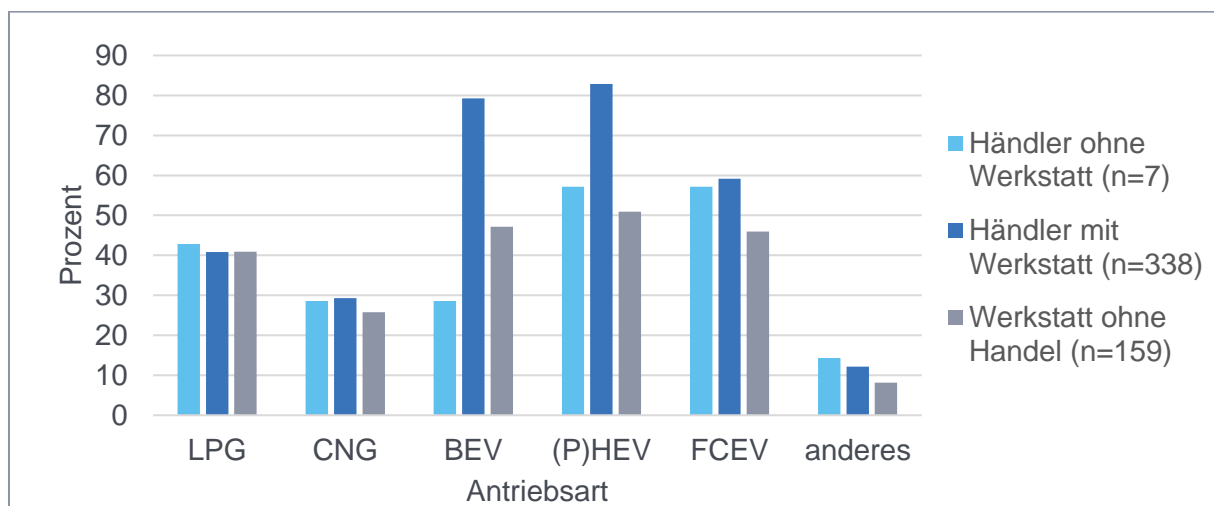
Alle drei genannten Informationsquellen zur Beantwortung der Frage, welche Faktoren wichtig für die gesellschaftliche Akzeptanzlage sind (Experteninterviews aus der Akteursanalyse, Medienanalyse, Fragebogen Projektverbünde) zeigen bei einem Vergleich deutliche Übereinstimmungen bzw. kongruente Befunde. **Als Kategorisierungsansatz zur Strukturierung der akzeptanzrelevanten Faktoren bietet sich zunächst eine grobe Einteilung in die Kategorien Kosten (bzw. Kosten/Nutzen-Verhältnis), Umwelt und Anwendung an. Diese Hauptkategorien von Akzeptanzfaktoren kristallisieren sich sowohl bei den Experteninterviews, in der Medienanalyse und in der Fragebogenerhebung unter den Verbänden heraus.** Weitere Themenkreise, aus denen akzeptanzrelevante Faktoren hervorgehen, sind Fragen der (v.a. politischen) Rahmenbedingungen für synthetische Kraftstoffe (sowohl in Bezug auf deren Herstellung, als auch ihre Chancen auf Kraftstoffmärkten für Endverbraucher) und Aspekte der Risikowahrnehmung (Gewährleistung von Sicherheit und Gesundheitsschutz bei der Herstellung und der Nutzung von synthetischen Kraftstoffen).

### Akzeptanzerhebungen bei Intermediaries, Bereich Straßenverkehr

Mittels Online-Kurzfragebögen und telefonischer Interviews wurden spezifische Akteursgruppen mit Multiplikator- bzw. Schnittstellenfunktion („Intermediaries“) im Verkehrsmodus Straßenverkehr nach Erfahrungen, Einstellungen und Erwartungen bzgl. alternativen Kraftstoffen und Fahrzeugantrieben befragt. Die Befragung richtete sich an Fahrschulen / Fahrlehrer und an das Kfz-Gewerbe (Autohändler und Werkstätten) im gesamten Bundesgebiet. Die Online-Fragebögen wurden von rund 660 Personen ausgefüllt, knapp 40 Personen konnten telefonisch interviewt werden.

#### Kfz-Gewerbe

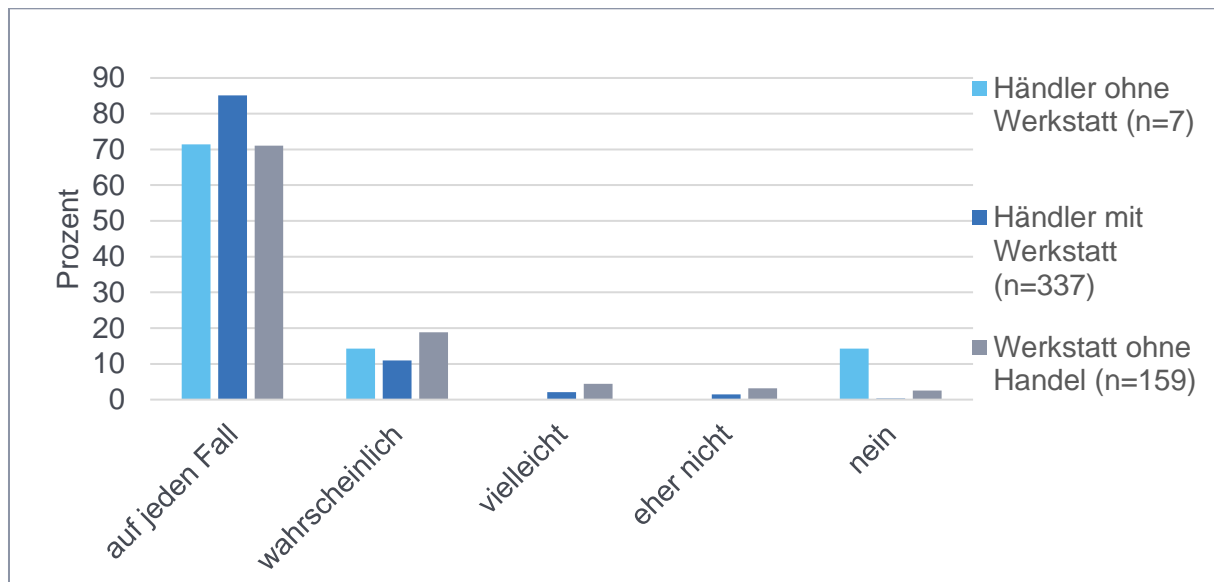
Was die aktuelle Verbreitung alternativer Antriebe in den Kfz-Betrieben angeht, sind **Batterieelektrische Fahrzeuge (BEV) und (Plug-In-)Hybride (PHEV) mittlerweile bei einer deutlichen Mehrheit der Kfz-Betriebe im Fahrzeugangebot enthalten** und es werden auch Werkstatt- und Serviceleistungen für solche Fahrzeuge angeboten. Daneben existieren Verkaufs- bzw. Serviceangebote für Fahrzeuge mit Autogas- und Erdgasantrieben in ca. 30 bis 40 % der Betriebe. Für Brennstoffzellenfahrzeuge (FCEV) liegen die entsprechenden Quoten hingegen mit unter 10 % noch recht niedrig.



**Abbildung 8-6:** Nach welchen alternativen Antrieben fragen / informieren sich Kunden in den Kfz-Betrieben?

Die **stärkste Kundennachfrage besteht offenbar nach vollelektrischen und hybridelektrischen Fahrzeugen**. Aber rund die Hälfte der befragten Betriebe gibt auch an, dass bereits ein Kundeninteresse an Brennstoffzellenfahrzeugen besteht. Dies steht in auffallendem Kontrast zum noch geringen Angebot an entsprechenden Fahrzeugen das die Händler und Werkstätten den Kunden hier machen können. Zudem deuten die Befragungsergebnisse darauf hin, dass das Kundeninteresse noch auf eingeschränkte Wissensbestände und Informationskompetenzen bzgl. Brennstoffzellenfahrzeugen bei einem Großteil der Mitarbeiter in den Kfz-Betrieben trifft. Was den Kenntnisstand über synthetische Kraftstoffe angeht, so lässt sich aus den Befragungen schlussfolgern, dass zwar – naheliegender Weise – kaum praktische Erfahrungen in den Betrieben bzw. bei deren Mitarbeitern vorhanden sind, aber bei vielen zumindest ein

theoretisches (Basis-)wissen vorhanden ist. Es zeigt sich eine **mehrheitlich positive Bewertung von synthetischen Kraftstoffen**, die sich vor allem aus den angenommenen Umweltvorteilen gegenüber fossilen Kraftstoffen sowie aus der Kompatibilität mit bekannten Fahrzeugtechniken, Gebrauchsroutinen und Infrastrukturen speist. Der große Energiebedarf in der Produktion und Zweifel an einer unproblematischen Verwendung in (älteren) Bestandsfahrzeugen mindern bei einem Teil der Befragungsteilnehmer die Zustimmung zu synthetischen Kraftstoffen.



**Abbildung 8-7:** Wie groß ist die Bereitschaft, zukünftig in betriebseigenen Fahrzeugen synthetische Kraftstoffe zu nutzen?

Die Befragung ergab dennoch eine grundsätzlich sehr **große Bereitschaft der Kfz-Betriebe, in Zukunft in betriebseigenen Fahrzeugen (z.B. Vorführwagen, Kundenersatzfahrzeuge) synthetische Kraftstoffe zu nutzen**. Unter den wichtigsten Voraussetzungen dafür rangierten annehmbare Kosten an erster Stelle; ein deutlicher Mehrpreis gegenüber fossilen Kraftstoffen wird nur in sehr begrenztem Umfang akzeptiert. Häufig wurde auch der Wunsch nach staatlichen Förderungen (vergleichbar Elektroautos) genannt, um mögliche Mehrkosten zu kompensieren. **Bei ihrer Kundschaft sehen die Kfz-Betriebe bisher nur sehr geringes Wissen über und Interesse an synthetischen Kraftstoffen.**

### Fahrschulen

Die Resultate der Fahrschulbefragungen zeigen, dass **neben den konventionellen Verbrennungsantrieben zunehmend ergänzend auch BEV und PHEV-Fahrzeuge in den Fahrschulen** eingesetzt werden. Als Anschaffungsgründe werden am Häufigsten Kostenvorteile und das Interesse an der Technik genannt. Umweltmotive oder eine entsprechende Kundennachfrage (bzw. auch Werbegründe im Sinne einer „grünen Fahrschule“) werden etwas seltener als Anlass zur E-Autoanschaffung angegeben. Von einem gewissen allgemeinen Interesse an alternativen Antrieben bei ihren Kunden berichten viele Fahrschulen aber schon; gut ein Drittel gibt dies konkret für BEV/PHEV-Antriebe an, rund die Hälfte für wasserstoffbetriebene Fahrzeuge. Letztere wecken bei den Fahrschulbetrieben selbst mehrheitlich Interesse, werden aber aus Kostengründen und wegen ungenügender Betankungsmöglichkeiten derzeit und für

die nähere Zukunft nicht als praktikable Antriebsalternative bewertet. **Etwa jeder dritte befragte Fahrschulmitarbeiter gibt an, dass ihm synthetische Kraftstoffe, als eine weitere Antriebsalternative, bisher unbekannt sind oder er nicht sicher sagen kann, was synthetische Kraftstoffe sind.** Etwas mehr als die Hälfte der Fahrschulmitarbeiter kann sich vorstellen, im Falle der Verfügbarkeit auf jeden Fall oder zumindest wahrscheinlich synthetische Kraftstoffe zu nutzen (weitere ca. 20 % antworten mit „vielleicht“). Allerdings müssten dafür bestimmte Bedingungen erfüllt sein, wobei ein nicht zu hoher Preis am häufigsten genannt wird. Weitere Nutzungsvoraussetzungen umfassen die Verträglichkeit des Kraftstoffes mit den Motoren (bzw. eine Herstellerfreigabe für das eigene Fahrzeug) und ein nachgewiesenermaßen positiver Effekt für die Umwelt. **Viele Befragte sehen in synthetischen Kraftstoffen allerdings bestenfalls eine Übergangslösung oder ein Nischenprodukt;** ihr größtes Potenzial wird im Bereich Lkw / Nutzfahrzeuge gesehen (oder außerhalb des Straßenverkehrs).

Zusammengefasst geben die Datensätze aus den Online-Befragungen des Kfz-Gewerbes und der Fahrschulen somit Auskunft über Akzeptanzfaktoren, welche die Einstellung gegenüber synthetischen Kraftstoffen beeinflussen. Aufs Wesentliche kondensiert lässt sich sagen, dass wiederum Kostenaspekte (z.B. Kraftstoffpreise, Kosten durch Mehrverbrauch, Kosten für Fahrzeugumrüstungen), Anwendungsaspekte (z.B. Verträglichkeit der Kraftstoffe / Fahrzeugkompatibilität, Verfügbarkeit der Kraftstoffe, Auswirkungen auf Motorleistung / Reichweite) und Umweltaspekte (z.B. Umweltauswirkungen der Kraftstoffherstellung, Klimabilanz und Energieeffizienz, Schadstoffemissionen im Fahrzeugbetrieb) die dominierenden Kriterien zu sein scheinen.

#### *Expertenbefragungen Luftverkehr*

Zur Ermittlung von in der Luftfahrtbranche vorhandener **Meinungen, Einstellungen und Akzeptanzlagen** bezüglich Treibhausgas (THG) –reduzierter bzw. –freier Antriebe allgemein und alternativer (synthetischer) Treibstoffe (SAF, Sustainable Aviation Fuels) im speziellen, wurden Interviews mit verschiedenen Akteuren der Branche geführt. Dabei handelte es sich um telefonisch oder per Online-Meeting durchgeführte Experteninterviews, die durch einen vorab erstellten Interview-Leitfaden eine halbstrukturierte Form aufwiesen. Die Dauer der Interviews variierte von ca. 45 bis ca. 65 Minuten. Da keine Aufzeichnungen der Gespräche stattfanden, wurden (vornehmlich am Ziel der inhaltlichen bzw. sinngemäßen Dokumentation des Gesagten orientierte, aber auch markante Zitate festhaltende) Mitschriften angefertigt. **Wichtige Themenkreise**, die in den Interviews angesprochen werden sollten, waren folgende:

- Klimaschutz im Luftverkehr allgemein - aktueller Stand und aktuelle Entwicklungen
- Potenzial unterschiedlicher alternativer Flugzeugantriebe/ -treibstoffe - Voraussetzungen, Herausforderungen, Hemmnisse
- Politische und regulatorische Rahmenbedingungen (inkl. Normung etc.) für alternative Treibstoffe
- Aspekte einer (techno-)ökonomischen Bewertung von alternativen Treibstoffen
- Unterstützende Maßnahmen für Markteinführung/ -hochlauf alternativer Treibstoffe
- Anpassungsbedarfe beim Einsatz von alternativen Treibstoffen (Flugzeuge, Infrastrukturen, Arbeits- / Betriebsprozesse etc.)



### Interviewte Personen

- Geschäftsführer\*in eines Flughafens
- Leitende Mitarbeiter\*innen einer Landes-Luftfahrtbehörde / eines Luftfahrt-Referats in einem Landesministerium (2 Personen)
- Geschäftsführer\*in eines PtL-Kerosin Start-Ups
- Leitende Mitarbeiter\*innen eines (kleineren) Flugzeugherstellers (2 Personen)
- Leitende Mitarbeiter\*in eines (großen) Flugzeugherstellers
- Leitende Mitarbeiter\*innen eines Triebwerkherstellers (2 Personen)
- Leitende Mitarbeiter\*in eines Luftfracht-Logistikers
- Leitende Mitarbeiter\*in eines Luftverkehr-Interessenverbandes

### Antriebsoptionen für mehr Klimaschutz im Luftverkehr

Unter den interviewten Akteuren herrscht Einigkeit darüber, dass das Thema THG-Emissionen in der Luftfahrt-Branche mittlerweile sehr präsent ist, auch wenn der Weg zur Reduktion der Emissionen teils noch unklar ist. Es werde wohl noch ein paar Jahre dauern, bis entschieden ist, ob synthetisches Kerosin in bisherigen Triebwerken „das Rennen macht“, oder ob Wasserstoff direkt genutzt wird - was letztlich effizienter und kostengünstiger sei. Viele sehen in **synthetischen Kraftstoffen** (bzw. **SAF**) den größten Hebel zur Verminderung der Klimawirkungen der Luftfahrt. Die PtL-Roadmap des Bundes weise dabei eher in Richtung strombasiertes als biogenes Kerosin; wesentliche Akteure (Politik, Airlines, Verbände, ...) bewegten sich nun in diese Richtung. Dennoch bestünden noch viele Unklarheiten; bei Flugzeugherstellern z.B. technische und genehmigungsrechtliche Fragen betreffend. Biobasierte SAF seien mengenmäßig zwar begrenzt (Flächenverbrauch, Nahrungsmittelkonkurrenz, auch Bioabfall-Aufkommen etc.), aber wenigstens für eine Übergangszeit wohl unverzichtbar. Allerdings könnte es auch bei grünem Wasserstoff (als Vorprodukt für PtL-SAF) an der Produktion ausreichender Mengen scheitern. Prognostiziert wird, dass man neben neuen Kerosin-ähnlichen Kraftstoffen (drop-in/non-drop-in) vermutlich auch **Batterie-elektrische Antriebe** und Wasserstoffantriebe brauchen werde. Zumindest erstere voraussichtlich nur für kleinere Flugzeuge (auch Flugtaxi), da Batterien wegen der ungünstigen Relation Energiedichte / Gewicht wohl auch auf mittlere oder sogar längere Sicht nicht für große Maschinen und weite Strecken geeignet seien.

**Wasserstoff** sei „auf dem Papier sehr interessant“, hätte evtl. auch Vorteile bei nicht-CO<sub>2</sub>-Effekten, aber erste Wasserstoff-Flugzeuge seien nicht vor 2035 zu erwarten und machten bis 2050 vielleicht ein paar Prozent der Flotte aus. Zudem gebe es große Investitionsbedarfe, um z.B. eine internationale Infrastruktur aufzubauen (Leitungen, Betankungsanlagen usw.). Es brauche Zeit, ein „Ökosystem für Wasserstoff“ zu entwickeln. Jetzt, da sich abzeichne, dass Wasserstoff wohl im Straßenverkehr nicht in der Breite kommen wird, sei in Sachen Investitionsbereitschaft „bei manchen die Begeisterung ein wenig raus“. Dessen ungeachtet arbeite man bei Flugzeugherstellern durchaus intensiv an Wasserstoffantrieben, man ist z.B. an entsprechenden Projekten beteiligt (innerhalb LUFO) oder hat entsprechende (Hybrid-)Konzepte schon auf der ILA präsentiert. Dabei ist noch offen, ob es letztlich in Richtung Wasserstoff als Turbinen-Treibstoff oder zum Einsatz in einer Brennstoffzelle gehen wird; wobei es jedoch noch gar keine Brennstoffzellen im für die Luftfahrt-Anwendung erforderlichen Leistungsbe- reich gebe. Und in beiden Fällen seien die H<sub>2</sub>-Speicherung und ein angepasstes Treibstoffsystem an Bord noch große Herausforderungen. Manche betrachten es als völlig offene Frage,

ob sich das Fliegen mit Wasserstoff wirklich durchsetzen kann (Probleme mit Energiedichte, Gewicht, Tanks). Die Brennstoffzelle sei für den Hauptantrieb evtl. auch längerfristig nicht geeignet, auch weil sie bei 1 MW Leistung 1 MW (Ab-)Wärme produziert, und die Wärmeableitung im Flugzeug ein Problem sein könnte.

#### SAF aus Biomasse oder aus PtL-Prozessen

Zur Frage, ob **biogenes oder strombasiertes Kerosin** das größere Potenzial hat, besteht keine einheitliche Meinung unter den Interviewten. Auf der einen Seite heißt es, die „Bio-Euphorie“ von vor einigen Jahren sei etwas verflogen, nachdem Studien gezeigt hätten, dass Kraftstoffe aus Anbaubiomasse statt erhofften 80-90 % CO<sub>2</sub>-Ersparnis nur 30/40 % erzielen. Hinzu komme die Flächenkonkurrenz mit der Nahrungsmittelproduktion. Verbreitet werden Biokraftstoffe der 1. Generation als nicht optimale Option betrachtet, abfallbasierte Bio-Kraftstoffe seien natürlich besser. Grundsätzlich aber werden, wenigstens in den nächsten 10-15 Jahren, Biofuels wegen noch stark begrenzter PtL-Produktionskapazitäten eine wichtige Rolle spielen. Und einige Akteure sehen auch noch großes Potenzial, was SAF aus Bioabfällen angeht. Es gebe genug Biomasse (aus sämtlichen Formen biogener Reststoffe und Pflanzenöle, die nicht mit Nahrungsmitteln konkurrieren und keine Flächenkonkurrenzen mit sich bringen) für 500.000.000 t Kerosin/Jahr. Die deutsche Regierung plane aber leider keine Produktionsförderung für biogene SAF, auch wenn aktuell zur Bekämpfung der Energiekrise eine allgemeine Erhöhung der Biokraftstoff-Erzeugung wahrscheinlich erscheine; davon könne dann vielleicht auch die Luftfahrt profitieren. Andernorts favorisiert man PtL-Kerosin gegenüber Biofuels, denn bei vielen Varianten der Letztgenannten sei die THG-Minderung verglichen mit fossilem Kerosin zu gering. Man wisse aber, dass man mit dieser Festlegung in der Branche eine Besonderheit sei. Manche sehen die ganze EU, und besonders Deutschland, auf einem Sonderweg, weil global betrachtet der Fokus bei SAF viel mehr auf einer Ausweitung der Bio-SAF-Erzeugung liege als auf einem schnellen Aufbau von Produktionsanlagen für PtL-SAF. Die Vorbehalte gegenüber biogenem SAF in Deutschland (wegen Konkurrenz zur Nahrungsmittelproduktion und Biodiversitätsbedenken) würden von manchen politischen Parteien getriggert, obwohl man zu einem Drittel des Preises von PtL-SAF den gleichen THG-Einsparereffekt erreiche. Andere vermuten, dass man so stark auf PtL setze, weil man sich für die heimische Industrie viel verspreche von einem zukünftigen Export entsprechender Technologien. Unterdessen orientiere man sich in anderen Regionen der Welt (USA, GB) viel stärker in Richtung biogene Fuels, und die Bio-SAF-Vorgaben von Seiten der ASTM (American Society for Testing and Materials) besagten auch, dass zu deren Herstellung keine Rohstoffe verwendet werden sollen, die in Konkurrenz zur Nahrungsmittelproduktion stehen.

Bei PtL-Kraftstoffen stehen grundsätzlich zwei **Herstellungsverfahren** zur Wahl, zu deren Vor- und Nachteilen sich manche der Interviewten äußern. So könne man beim Weg über die Methanol-Route eine höhere Produkt-Selektivität erreichen als beim Fischer-Tropsch-Verfahren, bei dem man immer ein Gemisch von kürzeren und längeren Kohlenwasserstoff-Ketten habe. Gerade in kleinen Anlagen sei dies ein ungünstiger Effekt, in großen Anlagen sei die Effizienz besser. Allerdings gebe es auch für viele der Nebenprodukte einen Markt, was das Problem entschärfe. Andere sehen in der Produktpalette, die man beim Fischer-Tropsch-Verfahren erhält ggf. sogar einen vorteilhaften Umstand. Es helfe dabei Verteilungskonflikte bei der Allokation begrenzter PtL-Mengen, zwischen den Verkehrsbereichen zu vermindern, da man verschiedene Produkte / Kraftstoffe für verschiedene Anwendungen erhalte.

### Normung und Zertifizierung

Die Frage des Herstellungsweges ist auch von Bedeutung bei der Normung und Zulassung von PtL-SAF. Denn während nach dem Fischer-Tropsch-Verfahren produzierte SAF bereits ASTM-zertifiziert seien (5 oder 6 alternative Pfade seien hier zugelassen), sei für SAF aus der Methanol-Route bisher noch von niemandem eine ASTM-Zulassung beantragt worden; das stehe zwar möglicherweise kurz bevor, aber solch ein Zulassungsprozess brauche dann auch eine gewisse Zeit. Außer einer Normung und Zulassung durch die ASTM sei im nächsten Schritt auch eine Zulassung von Seiten der Flugzeug- bzw. Triebwerkhersteller erforderlich. Diese müssen neuen Kraftstoffen eine Freigabe für ihre Maschinen erteilen, und auf die Hersteller und ihre Einschätzung verlassen sich dann auch die Flugzeugbetreiber / Airlines, da gehe es um Gewährleistungsansprüche usw. Wichtig wäre vielen Interviewten, dass neue Treibstoffe möglichst auch in etwas älteren Flugzeugen genutzt werden können. Blends mit 50% synthetischem Kerosin seien Drop-In-fähig, ohne Anpassungserfordernisse bei den Flugzeugen. Für die Zukunft sei auch eine Freigabe für 100%iges PtL-Kerosin zu erwarten; ein gewisser Anteil an aromatischen Verbindungen im Treibstoff erfordere dann evtl. einen Austausch von einigen Dichtungen. Flugzeug- und Triebwerkhersteller betonen, dass aktuelle Modelle zeitnah auf die Kompatibilität mit (höherprozentigen) SAF-Blends hin getestet würden und das Design neuer Modelle konsequent für die SAF-Nutzung ausgelegt werde.

### Politisch-rechtliche Rahmenbedingungen für SAF-Produktion und -Nutzung

Bei der Einführung von SAF habe man es mit einem komplexen Regelungsgeflecht zu tun, an dem viele Akteure mitwirken und in welchem „einer auf den anderen schaut“. Dabei komme in der Luftfahrt internationalen Organisationen und Verbänden eine wichtige Rolle zu (v.a. ICAO, teils auch IATA). Die Ziele und Maßnahmen zum nachhaltigen Fliegen, welche von der ICAO (International Civil Aviation Organization) bisher verfolgt werden, sind jedoch nach Meinung einer Mehrheit der Interviewten nicht ambitioniert genug (bspw. das enttäuschende CORSIA-Programm). Manche stellen auch die Frage, ob man angesichts dessen, dass wegen einiger „bekannter Bremser“ auf globaler Ebene oft nur unzureichende Kompromisse erzielt werden, nicht doch besser auf regional-kontinentaler Ebene (konkret z.B. EU) entschlossener vorangehen sollte (und damit evtl. andere „mitziehen“, etwa USA, Kanada, Japan). Andere geben zu bedenken, dass sich die EU bei ihren Entscheidungen nicht von internationalen Regelungen bzw. Entwicklungen abkoppeln könne.

In der EU sei derzeit einiges in Planung (Fit for 55, ReFuelEU Aviation u.a.), was viele gute Veränderungen bringen könne. Die vorgesehenen **SAF-Quotenvorgaben** werden allgemein begrüßt, teilweise hätte man sich sogar mehr gewünscht, etwa 10 % SAF in 2030. Von anderen werden speziell die Unterquoten für PtL-SAF unterschiedlich bewertet; entweder als sehr ambitioniert, angesichts verfügbarer SAF-Mengen oder als besonders wichtig, um das gegenüber biogenen SAF teurere PtL-Produkt zu fördern. Unterschiedliche Ansichten vertreten die Interviewten bezüglich möglicher Auswirkungen höherer nationaler Quoten. Manche sehen die Gefahr von Ausweichreaktionen durch Airlines und Carbon Leakage (Verlagerung von CO<sub>2</sub>-Emissionen). Andere denken, dass diese Risiken überbewertet sind bzw. speziell von Airlines oft übertrieben dargestellt werden; die EU werde Lösungen finden, damit europäische Airlines nicht benachteiligt sind. Die Maßnahmen der Politik dürften sich jedoch nicht auf Quotenvorgaben beschränken, sondern müssten insbesondere auch Förderungen beinhalten, die den Aufbau von SAF-Produktionsanlagen beschleunigen. PtL-Start-Ups und Hersteller bräuchten

Unterstützung von der Politik, um sich zu vergrößern, sie brauchen Sicherheiten (z.B. garantierte Abnahme des Kraftstoffs); mit mehr Produktionsvolumen werden dann auch die Kraftstoffkosten sinken. Derzeit stünden Investoren auch wegen noch ausstehender Entscheidungen auf EU-Ebene (u.a. RED II, Renewable Energy Directive) auf der Bremse, hier sollte jetzt möglichst schnell Klarheit geschaffen werden. Außerdem wird vorgeschlagen, die Einnahmen aus der deutschen Luftverkehrssteuer zur Förderung von SAF-Produktion und Technologieentwicklung zu verwenden. Zudem sollte die globale Zusammenarbeit ausgebaut werden. Weil die PtL-Produktion große Mengen Erneuerbarer Energie braucht, sollten Partnerschaften mit sonnen- und windreichen Ländern aufgebaut werden.

#### Nachhaltigkeitskriterien für die PtL-Produktion

Ein wichtiger Bestandteil politisch-rechtlicher Rahmensetzungen für die PtL-Produktion sind Mindestanforderungen in Sachen Nachhaltigkeit. Zu erwarten ist, dass die Nachhaltigkeit der Erzeugungswege nachgewiesen werden muss, wie z.B. auch bei Biokraftstoffen. Wichtig sei eine nachvollziehbare Darlegung der Herstellungswege und Rohstoffe für SAF / PtL-Kerosin. Für viele Interviewte ist die Verwendung von mit Erneuerbarer Energie produziertem, grünem **Wasserstoff** dabei ein zentraler Punkt, sie sei unumgänglich für eine gute THG-Bilanz der PtL-Kraftstoffe. Für einzelne Akteure wäre zunächst auch die Nutzung von Wasserstoff akzeptabel, der unter Anwendung von Carbon Capture oder mit Hilfe von Atomstrom hergestellt wird, auch wenn dieser nicht die erste Wahl sei und man bei zukunftsorientierten Projekten auf grünen Wasserstoff setze. Neben der Stromherkunft bei der Wasserstoffherstellung betrifft eine weitere Hauptfrage die **Kohlenstoffquelle**. Günstiges CO<sub>2</sub> werde für die PtL-Produktion ein limitierender Faktor sein. Industrielle Punktquellen oder Biomasse seien derzeit noch geeigneter als das viel teurere DAC (Direct Air Capture) -Verfahren. Langfristig wolle und könne man aber nicht auf industrielle Herkunft setzen, sondern müsse die DAC-Technologie weiterentwickeln, damit diese ausreichende Kohlenstoffmengen liefern kann und die aktuellen Kosten (600 Euro pro t) deutlich sinken. Allgemein müsse man pro und contra gut abwägen bei der Frage, wie streng Vorgaben zur Nachhaltigkeit der PtL-Produktion sein sollen, gerade zu Beginn des Markthochlaufs. Würden z. B. fossile CO<sub>2</sub>-Quellen zugelassen, binde man sich ggf. für Jahrzehnte an diese, was letztlich nicht nachhaltig sei. Daher sei es nachvollziehbar, wenn bei EU-Regularien und staatlichen Förderprogrammen auf PtL-Produktionswege gesetzt werde, die „wirklich grün“ sind (hinsichtlich Wasserstoff, C-Quelle etc.). Am Ende sei das besser so, auch wenn die Dynamik einer Skalierung damit vielleicht etwas gebremst werde, denn aus zunächst „lascheren“ Regeln käme man später wohl nicht mehr raus. Fraglich sei jedoch, ob Akteure andernorts (z.B. in China) ähnlich hohe Nachhaltigkeitsanforderungen an die PtL-Produktion stellen werden, was ggf. Wettbewerbsverzerrungen zur Folge habe.

#### Markteinführung und mögliche Unterstützungsmaßnahmen

Der Einstieg in die praktische Anwendung von (PtL-)SAF sei eventuell an kleineren Flughäfen eher umsetzbar als an großen Drehkreuzen wie z.B. Frankfurt. Als Flughafenbetreiber ist man dabei aber auch auf andere Akteure angewiesen, so müsse der Treibstofflieferant erst mal SAF bereitstellen. Mengenverfügbarkeiten könnten hier noch ein kritischer Punkt sein. Teilweise sei fraglich, inwieweit etablierte Mineralölfirmen bei der (PtL-)SAF-Einführung mitmachen oder ob sie „so lange wie möglich beim alten, fossilen bleiben“. Eventuell treten neue Player auf dem Markt in Erscheinung (die evtl. Liefergarantien für bestimmte Mengen an SAF

anbieten), eine stärkere Diversifizierung bei den Kraftstoffanbietern sei zu erwarten. Ein schneller Wechsel zu alternativen Anbietern sei wegen langer Kündigungsfristen und den vom bisherigen Treibstofflieferanten getätigten Infrastruktur-Investitionen am Airport jedoch schwierig. Generell bestehe im Zuge einer breiten Markteinführung von SAF der Bedarf des Aufbaus von teilweise neuen **Logistikketten**. Erforderlich sei etwa, dass eine wichtige NATO-Pipeline (gemeint ist CEPS) in Europa für die SAF-Verteilung genutzt werden darf. Deutschland habe dem aber lange nicht zugestimmt, trotz bereits mehrjähriger Prüfung (seit Anfang 2023 liegt die deutsche Zustimmung vor). Es wird erwartet, dass die Einführung von (PtL-)SAF systemisch erfolgen wird, mit zunächst sehr kleinen, und dann sukzessive steigenden Beimischungen zum normalen Kerosin. In einigen Jahren werde ein Kerosin-Gemisch mit bestimmtem PtL-Anteil generell an Airports verfügbar sein und alle Flugzeuge damit betankt; es werde wohl keine separaten Tankanlagen für verschiedene Flugzeuge oder Airlines geben, die mehr oder weniger PtL-Kraftstoff tanken wollten.

Damit Nachfrageseitig ein Signal zu verstärkter SAF-Nutzung gesetzt werden kann, könnte ein **Book & Claim**-Ansatz verfolgt werden. Dabei handele es sich um eine Form des Zertifikatehandels, bei dem SAF (als physische Ware) und Zertifikate für die Nutzung nachhaltiger Flugkraftstoffe getrennt voneinander gehandelt werden. Die Zertifikate stehen dabei für eine genau bestimmbare Menge an SAF, die produziert, aber nicht physisch vom Erwerber der Zertifikate (z.B. einer Airline) genutzt wird. Auf diese Weise können z.B. Airlines bilanziell SAF „tanken“ und am Treibstoffmarkt ein Nachfragesignal setzen, auch wenn an einem Flughafen physisch noch kein SAF verfügbar ist (oder nur ein einheitlicher geringer SAF-Anteil im Treibstoff enthalten ist). Als ein Vorteil wird die Markteffizienz genannt, denn es sei unpraktikabel, SAF von den (zunächst noch wenigen) Produktionsanlagen zu allen potenziellen Vertankungsstellen (Airports) zu verteilen; Verteilungsstrukturen müssten erst nach und nach auf- und ausgebaut werden. Beim Zertifikatehandel dürfe es aber keine Kontrolllücken geben. Manche Unternehmen hätten bereits in Eigenregie ein vergleichbares System aufgebaut und machten ihren Kunden entsprechende Angebote für „grünes Fliegen“, die auch durchaus zunehmend nachgefragt seien, gerade bei Geschäftsreisenden oder im Bereich Frachttransport. Airlines könnten mit passenden Marketingmaßnahmen einen Teil der Kundschaft zur Aufpreiszahlung für nachhaltiges Fliegen bewegen. Der Anteil der nachhaltigkeitsbewussten Passagiere werde voraussichtlich zunehmen, gerade bei Geschäftskunden, die ohnehin weniger preissensitiv seien. Und Billigangebote könne und sollte es auf Dauer ohnehin nicht mehr geben. Manche Airlines verbreiteten hingegen unbegründete „Preisdrohungen“, wonach die Kosten für normale Flugtickets durch die SAF-Beimischung spürbar steigen würden; das seien unredliche Behauptungen, denn gerade zu Beginn bringt der geringe SAF-Anteil nur einen minimalen Mehrpreis für die Airlines und die Passagiere. Grundsätzlich sei es aber wichtig, die Preis-Schere zwischen fossilem und synthetischem Kerosin zu schließen und Kostenparität zu erreichen, z.B. indem der Emissionshandel als Beitrag zur Internalisierung der Kosten bei den fossilen Kraftstoffen gestärkt wird.

#### *Expertenbefragungen Schiffsverkehr*

Zur Ermittlung von in der Schifffahrtsbranche vorhandener **Meinungen, Einstellungen und Akzeptanzlagen** bezüglich Treibhausgas (THG) –reduzierter bzw. –freier Antriebe allgemein und alternativer (synthetischer) Treibstoffe im speziellen wurden Interviews mit verschiedenen Akteuren der Branche geführt. Dabei handelte es sich um telefonisch oder per Online-Meeting durchgeführte Experteninterviews, die durch einen vorab erstellten Interview-Leitfaden eine

halbstrukturierte Form aufwiesen. Die Dauer der Interviews variierte von ca. 45 bis ca. 65 Minuten. Da keine Aufzeichnungen der Gespräche stattfanden, wurden (vornehmlich am Ziel der inhaltlichen bzw. sinngemäßen Dokumentation des Gesagten orientierte, aber auch markante Zitate festhaltende) Mitschriften angefertigt. **Wichtige Themenkreise**, die in den Interviews angesprochen werden sollten, waren folgende:

- Klimaschutz im Schiffsverkehr allgemein - aktueller Stand und aktuelle Entwicklungen
- Potenzial unterschiedlicher alternativer Schiffsantriebe /-treibstoffe - Voraussetzungen, Herausforderungen, Hemmnisse
- Politische und regulatorische Rahmenbedingungen (inkl. Normung etc.) für alternative Treibstoffe
- Aspekte einer (techno-)ökonomischen Bewertung von alternativen Treibstoffen
- Unterstützende Maßnahmen für Markteinführung /-hochlauf alternativer Treibstoffe
- Anpassungsbedarfe beim Einsatz von alternativen Treibstoffen (Schiffe, Infrastrukturen, Arbeits- / Betriebsprozesse etc.)

#### Interviewte Personen

- Leitende Mitarbeiter\*in eines Schiffsmotorenbau-Zulieferers
- Leitende Mitarbeiter\*in eines Kreuzfahrtunternehmens
- Leitende Mitarbeiter\*innen eines Schiffsmotorenbauers (2 Personen)
- Geschäftsführer\*in eines Interessenverbands der maritimen Industrie
- Referent\*in eines Interessenverbands der Seeschifffahrt

#### Antriebsoptionen für mehr Klimaschutz im Schiffsverkehr

Als erster Schritt in Richtung Schiffstreibstoffe mit reduziertem THG-Ausstoß wird vielfach die Nutzung von **LNG** genannt, also zunächst noch fossiles Flüssiggas. Seit einigen Jahren werde es vermehrt im Hafenverkehr, in der küstennahen Schifffahrt, bei Fähren und bei Kreuzfahrtschiffen eingesetzt. Derzeit sei LNG der sauberste Brennstoff, v. a. Feinstaub- und Schwefel-emissionen seien stark reduziert, allerdings seien die Vorteile betreffend Stickoxide und THG eher gering. Dennoch sehe man viel Dynamik im Bereich LNG (z.B. Bereitstellung von Bunkerschiffen, Containerschiffen und Kreuzfahrtschiffen), häufig in Dual-Fuel-Bauweise. Praktisch alle heute bestellten Kreuzfahrtschiffe seien LNG-angetrieben und laut aktuellem Orderbook machen LNG-betriebene Schiffe insgesamt ca. 16 % der Bestellungen aus (oft bereits mit Umrüstooption auf Methanol, wofür bei Klassifikationsgesellschaften schon Readiness-Labels vorbereitet würden). Von anderen Interviewten wird jedoch etwas relativierend angeführt, dass die Nachfrage nach LNG-Antrieben zwar vor ein paar Jahren etwas gestiegen sei, daraus „aber keine große Welle“ entstand. Die THG-Bilanz von Methan sei auch gar nicht so positiv (Schlupf!), was zu einer kritischeren LNG-Bewertung führen werde, wenn es stärker bekannt werde. Im eigenen Unternehmen treibe man Entwicklungen im Bereich LNG darum nicht mehr aktiv voran. Heute arbeite man v.a. an Technologien für Methanol, Ammoniak und Wasserstoff, wozu es auch viele Technologieanfragen von Kunden gebe. Als fossiler Brennstoff könne LNG ohnehin nur als Brückentechnologie für etwa die nächsten 20 Jahre dienen. Auch sei

fraglich wie lange die derzeit noch attraktiven Treibstoff-Kosten bei LNG noch Bestand hätten. Abgesehen davon sei LNG nie die Wunschlösung der Schifffahrtsbranche gewesen; die „Energiegiganten“ (die großen Mineralölkonzerne) hätten das LNG irgendwann angeboten und die Schifffahrt habe es eben angenommen. Dabei sei die LNG-Versorgung eigentlich recht aufwändig, es sei noch lange nicht überall verfügbar und die Technik auf dem Schiff sei komplex (wegen tiefgekühlter Lagerung etc.); verglichen damit wären eine Methanol-Infrastruktur und entsprechende Systeme auf dem Schiff viel simpler.

Die Option einer Umrüstung auf **Methanol** sei sicher sinnvoll; in mancher Hinsicht seien sich die Treibstoffe ähnlich, mit einigen Vorteilen auf Seiten von Methanol (flüssig, einfacheres Handling, synthetische Herstellung weniger teuer als bei LNG). Hinsichtlich der Toxizität sei Methanol ähnlich zu bewerten wie Diesel, und schon heute sei es als Bio-Methanol verfügbar. Prinzipiell sei zudem eine Verfügbarkeit von Methanol in möglichst vielen Häfen einfacher zu gewährleisten als im Falle des LNG. Allerdings seien mit dem Thema Methanol gerade für Motorenhersteller noch einige Unsicherheiten bzw. offene Fragen verbunden, obwohl man inzwischen technologisch schon vergleichsweise weit gekommen sei, z.B. sehr gute Emissionswerte erziele. Ein Problem seien Wassereintragungen und nachfolgende Korrosionsgefahren, was aber andernorts als eher kleines Problem im Vergleich zu den Hürden bei anderen Kraftstoffen betrachtet wird. Jedoch gebe es auch keine ausgereiften Injektoren für Methanol-Motoren im hohen Leistungsbereich, hier seien noch Forschungs- und Förderprojekte nötig. Dennoch sehen zumindest in der Kreuzfahrtbranche viele Methanol als beste Option unter den neuen Kraftstoffen, auch die Umrüstung heutiger Schiffe sei möglich und mit vertretbaren Kosten verbunden.

Für eine Übergangszeit bis etwa 2030 erwarten manche zunächst noch eine größere Bedeutung für **biomassebasierte Drop-In-Treibstoffe**, wie bspw. HVO oder Biodiesel als Alternative für Schiffsdiesel oder Bio-LNG. Da aber alle biogenen Kraftstoffe mengenmäßig begrenzt seien, brauche man **E-Fuels** (synthetische PtX-Kraftstoffe). Von diesen werde sich dann wohl in erster Linie neben synthetischem Methanol das synthetische Methan / LNG durchsetzen. Paraffinischer Diesel (FT-Diesel) sei praktisch auch eine Drop-In-Lösung, sofern man einige Dichtungen austausche und die Motorsteuerung anpasse, man müsse aber keine Bauteile tauschen. **OME** sei zwar theoretisch in Blends mit bis zu 70 % Anteil in gängigen Motoren verwendbar (im Einzylinder-Teststand über kurze Zeiträume), aber in der Praxis und bei längerem Betrieb seien wegen Problemen mit der Materialverträglichkeit realistischer Weise höchstens OME-Anteile bis etwa 9 % möglich.

Besonders unterschiedlich sind die Einschätzungen der Interviewten zum Thema **Ammoniak**. Fast alle sehen hier wenigstens noch große Herausforderungen und Problemstellungen, v.a. hinsichtlich Sicherheit / Toxizität, Tanks und Betankung, Schlupf und Lachgasentstehung, aber auch Geruchsentwicklung. Gerade in der Personenschifffahrt, etwa bei Kreuzfahrtschiffen, und generell bei Schiffen, die oft innerstädtische (Hafen-)Bereiche anfahren (und dort dann auch mit Ammoniak betankt würden) sei mit Bedenken und Akzeptanzproblemen zu rechnen; auch Hafenbetreiber könnten dagegen sein. Wenn es gelänge, öffentliche Vorurteile gegenüber Ammoniak auszuräumen, sei die Anwendung in der Praxis im Grunde jedoch unkritisch; Lüftungssysteme auf den Schiffen könnten es z. B. schaffen, in betreffenden Bereichen (Motorenraum, Tank) gefährliche Ammoniak-Konzentrationen in der Luft zu verhindern ( $\text{NH}_3$  abfangen und in Wasser gelöst als Salmiakgeist fachgerecht entsorgen); insgesamt sei das gut

beherrschbar. Zudem sei zu erwarten, dass Ammoniak (als kohlenstofffreier Kraftstoff) langfristig günstiger sei als z. B. Methanol, wegen der viel leichteren und günstigeren Gewinnung von Stickstoff aus der Luft, als von Kohlenstoff aus der Luft.

Ammoniak ist, wie auch Methanol, nicht nur als Treibstoff für Verbrennungskraftmaschinen denkbar, sondern auch zur Verwendung in einer **Brennstoffzelle**. Dasselbe gilt für einen weiteren Energieträger, dessen Anwendungsmöglichkeiten in der Schifffahrt vermehrt diskutiert werden: **Wasserstoff**. Manche Interviewte geben an, dass man sich in ihrem Unternehmen / ihrer Organisation auch damit beschäftigt. Anderen erscheint der Wasserstoff-Einsatz wegen der geringen Energiedichte und den erforderlichen Tanks (Größe, Druckverhältnisse, Tiefkühlung) in weiten Bereichen der Seeschifffahrt als nicht umsetzbar, er sei bestenfalls für die Küsten- oder Binnenschifffahrt eine Option, oder bspw. für Hafenschlepper. Noch eingeschränktere Einsatzfelder werden dem batterieelektrischen Antrieb zugetraut, dem man Chancen in (Fluss-)Fähren oder in Privatyachten einräumt sowie als Komponente von Hybridlösungen, an welchen einige Reedereien zunehmend Interesse zeigten. Vereinzelt wird auch die Gesamt-CO<sub>2</sub>-Bilanz des Batterieantriebs kritisch hinterfragt (wenn Batterieherstellung und Entsorgung mit betrachtet werden).

#### Unterschiedliche Treibstoffe für unterschiedliche Schiffstypen

Es ist deutlich geworden, dass angesichts der Vielfalt unterschiedlicher Schiffstypen und Einsatzgebiete für die jeweiligen Anforderungen verschiedene Antriebsoptionen oder Treibstoffe geeignet sein werden. Des Weiteren führen branchenökonomische Gegebenheiten und Entscheidungsfaktoren zu einer mehr oder weniger großen Bereitschaft, auf alternative Treibstoffe umzusteigen. Hinzu komme, dass verschiedene Treibstoffe differente Anforderungen hinsichtlich der Betriebsabläufe auf dem Schiff stellen (Handhabung, Wartungsarbeiten). In der Vergangenheit seien Innovationen oft zuerst in der Fährschifffahrt und in der Kreuzschifffahrt zu beobachten gewesen. Mit einer zögerlichen Haltung sei etwa bei Schwergut-Reedereien zu rechnen, die **Bulkcarrier** und **Tanker** betreiben, welche nicht auf festen Routen oder Linien fahren; sie kämen in unterschiedlichste Weltregionen und Hafenstädte, weshalb hier die Sorge um fehlende Versorgungssicherheit (Tankmöglichkeiten) mit alternativen Kraftstoffen ein wichtiger Punkt sei. Gerade auf der Langstrecke sei auch die Energiedichte von Treibstoffen entscheidend, und da könnten die meisten alternativen Kraftstoffe nicht mit den heutigen mithalten. Bei LNG brauche man fast das doppelte Tankvolumen wie bei Schiffsdiesel, bei Ammoniak sei es das 2,8-fache, bei Wasserstoff sogar das 7- bis 8-fache, darum sei Wasserstoff beim Langstreckeneinsatz „eigentlich raus“.

Bei **Kreuzfahrtschiffen** gehen alle Akteure von wichtigen Weichenstellungen noch in dieser Dekade aus, und schon in der nächsten Dekade werden viele Schiffe mit neuen Antrieben in Betrieb gehen. Auch bei **Containerschiffen** seien die zu erwartenden Entwicklungen ähnlich, die finanziellen Ressourcen für eine Antriebswende seien dort sogar eher vorhanden, als in der Kreuzfahrtbranche. In der Containerschifffahrt könne bspw. die Ansage von Maersk, künftig zunehmend auf Methanol zu setzen, ein wichtiges Signal sein und den Weg für andere (auch kleinere) Wettbewerber vorzeichnen. Denn wenn ein Big Player wie Maersk auf Methanol setze, werde es z. B. vermehrt Tankstellen dafür in den Häfen geben, was den Treibstoff dann wiederum für andere attraktiver mache. Generell müsse man feststellen, dass eine Ver-



änderungsbereitschaft in Sachen Schiffsantriebe bisher v.a. in Europa zu erkennen sei. In vielen anderen Regionen der Welt sei das Thema noch nicht so präsent; gerade Tankschiffe und Bulkcarrier seien nicht selten in Ländern registriert, in denen Umweltaspekten nur ein geringer Stellenwert zugeschrieben werde.

Auch wenn die favorisierten Treibstoff-Lösungen also je nach Schiffstyp differieren werden, sei aber die wichtigste Entscheidungsbasis immer die Kostenstruktur. So rentierten sich die komplexen und kostspieligen Tanks für LNG z. B. bei Kreuzfahrtschiffen eher als bei Hafenschleppern. Das gelte auch im Falle von Überlegungen, ob man alte Schiffe durch Retrofit-Maßnahmen auf neue Treibstoffe umrüstet. **Retrofitting** sei gerade bei Schiffen mit langer Nutzungszeit ein guter Weg. Kreuzfahrtschiffe blieben z.B. sehr lange in Betrieb, die Nutzungszeiten betragen bis zu 50 Jahre, daher seien Retrofit und Refurbishing wichtige Themen. Das Abwägen von Umrüstungsoptionen unterscheide sich je nach Schiffstyp, bei kleineren Schiffen sei oft eher die ganze Antriebsanlage zu wechseln als nur kleinere Komponenten. Ein Interviewter weist auch auf Pre- oder Post-Combustion-Verfahren zur CO<sub>2</sub>-Abscheidung auf dem Schiff hin. Das sei zwar auch mit Kosten verbunden, aber trotzdem in manchen Fällen besser als z.B. ein Antrieb mit Ammoniak und Wasserstoff, weil viel einfacher zu handhaben.

Weiterhin sei zu bedenken, dass der Kraftstoff-Kostenanteil z.B. in der Kreuzschiffahrt grundsätzlich kleiner sei als in der Frachtschiffahrt; „grüne Aspekte“ könnten daher in der Kreuzschiffahrt leichter monetarisiert werden, auch wenn kaum ein Kunde 20 % mehr zahlen werde. Es werde künftig vielleicht auch spezielle Angebote für ein bestimmtes Kundensegment (umweltsensibel und zahlungskräftig) geben. Es wird aber auch die Ansicht geäußert, dass Kreuzfahrttouristen nur in geringem Ausmaß bereit seien, mehr Geld für saubere Antriebstechniken auszugeben. Die Zahlungsbereitschaft für Umweltverträglichkeit sei noch ein „zartes Pflänzchen“. Im US-amerikanischen Kreuzfahrttourismus sei die Bereitschaft hierzu noch geringer ausgeprägt als in Deutschland und Europa.

#### Normungs- und Klassifikationsfragen

Aus den Aussagen der Interviewten wird ersichtlich, dass es neben der Normung von (neuen) Kraftstoffen auch um Zertifizierung oder Zulassung der entsprechenden Kraftstoffsysteme auf den Schiffen bzw. von Schiffen als solche geht. Für die Normung von Kraft- bzw. Treibstoffen in der Schifffahrt sei v. a. ein von der **IMO** (International Maritime Organization) stammendes „Gesetzeswerk“ maßgebend, welches die Kraftstoffe selbst und deren Containment (Tanks etc.) behandelt, und auch Regularien und Vorschriften für den sicheren Einsatz der Kraftstoffe enthält. Darin seien einige der potenziellen neuen Kraftstoffe noch nicht enthalten (z.B. Methanol, Ammoniak, Wasserstoff), es werde jedoch aktuell darauf hingearbeitet. Daraus resultieren an manchen Stellen noch Unsicherheiten z. B. für Motorenentwickler und Schiffsdesigner, weil „noch keine Grenzen gesteckt sind“. Als Beispiel wird genannt, dass beim hygroskopischen Methanol noch unklar sei, bis zu welchem Ausmaß eine Norm für diesen Kraftstoff Wassereinträge (und damit verbunden auch Salzeinträge) toleriere, wovon etwa abhängt mit welchem Korrosionspotenzial man rechnen muss.

Mehrere Interviewte weisen auf die in der Schifffahrt besonders große Bedeutung der Themen **Sicherheit** und Handhabbarkeit von Kraftstoffen hin. Aus Sicht von Reedern stelle es ein zentrales Entscheidungskriterium dar, dass man sich „keine neuen Risiken an Bord holt“. Neben der Entzündbarkeit und der Giftigkeit, würden auch die Explosionsrisiken der eingesetzten

Brennstoffe bedacht, da diese eine Gefahr für Besatzung und Passagiere darstellen könnten. Für die sicherheitsbezogene Ausbildung der Besatzungen gebe es von der IMO vorgegebene Modellkurse für Besatzungsmitglieder, Offiziere und Ingenieure, die Ausbildungs- und Prüfungsinhalte seien international abgestimmt. Ähnlich wie dies vor einigen Jahren für LNG erarbeitet wurde, müsse entsprechendes nun für neue, synthetische Kraftstoffe erfolgen.

Die Zertifizierung von Kraftstoffsystemen auf dem Schiff falle zudem in den Aufgabenbereich der **Klassifikationsgesellschaften**. Diese säßen bei der Entwicklung von IMO-Codes und -Guidelines etc. zusammen mit anderen Stakeholdern (Staatliche und Wirtschaftsakteure) mit am Tisch. Einzelne Stimmen beschreiben Klassifikationsgesellschaften als tendenziell konservativ und sehen bei ihnen wenig Innovationsfreude und Expertise, wenn es um neue Kraftstoffe geht. Bei der Entwicklung neuer Richtlinien bzw. Anforderungskatalogen sollten die Klassifikationsgesellschaften stärker mit Schiffsdesignern kooperieren. Von anderer Seite wird die Ansicht vertreten, Foren für einen entsprechenden Austausch seien durchaus bereits vorhanden und würden auch genutzt, eben gerade unter dem Dach der IMO. Auch wenn einzelne Klassifikationsgesellschaften ggf. hier und da abweichende eigene Regeln setzen, falle das bei globaler Betrachtung nicht ins Gewicht. Außerdem beteiligten sich Klassifikationsgesellschaften auch an Förderprojekten; und das Anlegen etwas strengerer Regeln (gerade auch bei neuen Technologien) mache ja durchaus Sinn und begründe ein Stück weit auch die Existenzberechtigung der Klassifikationsgesellschaften.

#### Politisch-rechtliche Rahmenbedingungen für neue Kraftstoffe

Politisch bewege sich gerade einiges beim Klimaschutz im Schiffsverkehr. Auf internationaler Ebene – die gerade bei der Schifffahrt so wichtig sei – sind in erster Linie Aktivitäten der **IMO** entscheidend, die allerdings von den Interviewten etwas unterschiedlich bewertet werden. So wird bemängelt, dass die IMO vor etwa drei Jahren nur „schwammige“ Klimaschutzziele bis 2050 gesetzt habe (minus 50 % THG-Emissionen im Vgl. zu 2008), ohne geeignete Wege zur Zielerreichung aufzuzeigen oder konkrete Maßnahmen zu benennen. Viele Schiffshersteller und Reedereien würden das Vorgehen der IMO beim Klimaschutz inzwischen als zu träge betrachten und darum selbst „mehr Tempo machen“. Andere erkennen durchaus an, dass die IMO versuche, den Klimaschutz voranzubringen, aber einzelne Mitglieder seien eben „mächtige Bremser“, darum sei es schwer, die verschiedenen Interessen auf einen gemeinsamen Nenner zu bringen. Wenn die Mitglieder der IMO sich nach kontroversen Verhandlungen auf etwas einigen, dann helfe das unterm Strich dem Klimaschutz mehr, als wenn einzelne Akteure alleine mit höheren Zielen vorangingen. Wichtig sei, dass die progressiven IMO-Mitglieder (z. B. die EU-Staaten) versuchen, Mitstreiter für ein ambitionierteres Klimaschutzprogramm zu finden (z. B. USA, Kanada, Japan?).

So besteht bei manchen die Hoffnung, dass die **EU** mit den im Rahmen ihres Fit for 55-Pakets vorgesehenen Maßnahmen vielleicht im Kreis der IMO eine gewisse Zugkraft entwickeln kann und ein vergleichbares Regelwerk später auch auf globaler Ebene kommen wird. Das **Fit for 55**-Paket der EU (darin u.a. FuelEU Maritime, Energy Directive; Taxonomie-Richtlinie, ETS-Reformen) wird im Grundsatz von den Interviewten positiv beurteilt. Die Aufnahme des Schifffahrtbereichs in das European Union Emissions Trading System (EU ETS) sei richtig. Auch Quoten für alternative Treibstoffe seien gut, da sie einen Markt erzeugen, und Berechenbarkeit für die Kraftstoffproduzenten bringen. Aber die Fuel-Quoten sollten höher gesetzt werden und

außerdem kraftstoffspezifisch definiert sein. Ungünstig sei, dass bisher nur große Schiffe betroffen sein sollen, es müsste auf kleinere Schiffe ausgedehnt werden; ansonsten könnten große Schiffe z.B. EU-nahe Häfen in Nordafrika ansteuern und die Fracht dort auf kleinere Schiffe umladen, um sie in die EU zu bringen. Das führe zu Wettbewerbsverzerrungen, und auch der positive Klima-Impact werde verringert. Um der Gefahr vorzubeugen, dass Schiffsbetreiber woanders (außerhalb der EU) tanken, schlägt ein anderer Interviewter vor, zusätzlich die Emission Control Areas auszubauen (inkl. Strafzahlungen bzw. Anlegeverbote für „unsaubere“ Schiffe).

Neben dem Fit For 55-Paket wird die **Taxonomie-Verordnung** der EU als wichtiger Regulierungsrahmen genannt. Die Ausgestaltung der Taxonomie habe Einfluss auf Investitionsneigungen bzgl. des Aufbaus von Produktionsanlagen für synthetische Kraftstoffe. Manche befürchten bei Beschluss des bisherigen Verhandlungsstandes zwischen den EU-Institutionen, dass die Taxonomie kohlenstofffreie Kraftstoffe bzw. Technologien bevorzugen könnte (Wasserstoff, Ammoniak), womit bspw. Methanol benachteiligt wäre. Dabei sei aber die Chance der THG-Neutralität auch z. B. mit synthetischem Methanol gegeben, wenn der Kohlenstoff in einem geschlossenen Kreislauf geführt werde. Eine nicht gleichwertige Behandlung kohlenstoffhaltiger Kraftstoffe und den Alternativen Wasserstoff und Ammoniak erschwere es der Schiffbauindustrie in Deutschland (und der EU) von bestehenden Technologievorsprüngen bzw. Wettbewerbsvorteilen weiter zu profitieren. Man sollte den „Dogmatismus ablegen“, wonach kohlenstofffreie Kraftstoffoptionen zu bevorzugen seien, denn die Entwicklung bei Wasserstoff und Ammoniak würde noch zu lange dauern, um die für den Klimaschutz erforderlichen schnellen Lösungen zu bringen.

#### Nachhaltigkeitskriterien für die PtX-Produktion

Die ggf. erforderliche Abwägung zwischen den Zielen eines möglichst schnellen Beitrags zum Erreichen von THG-Emissionsminderungen und einer im umfassenden Sinne nachhaltigen Treibstoffherstellung, prägt auch die Diskussion um Nachhaltigkeitskriterien für die Produktion synthetischer Kraftstoffe. Auf globaler Ebene ist dies ein noch unterregulierter Bereich; so fänden sich etwa in den IMO-Regularien bislang keine Bestimmungen, welche die Erzeugung der Treibstoffe betreffen. Auf europäischer Ebene werden z.B. die oben erwähnten Instrumente des Fit for 55-Pakets und der Taxonomie-Verordnung hingegen absehbar einige Nachhaltigkeitskriterien beinhalten. Die Bewertung bestehender bzw. zu erwartender EU-Regularien durch die Interviewten fällt nicht uneingeschränkt positiv aus. So wird kritisiert, dass das Regelwerk der RED II (Renewable Energies Directive) „alles komplizierter macht“ durch die Vorgaben zur EE-Anlagen-Nutzung beim Betrieb von Elektrolyseuren. Hier seien Japan und die USA pragmatischer, die EU drohe evtl. „den Anschluss zu verlieren“, wenn hohe Anforderungen dieser Art die Marktentwicklung für Wasserstoff und dessen Derivate bremsen. Es sollte besser für die PtX-Technologie einen gewissen „Welpenschutz“ geben.

Weitere Interviewte merken an, dass zur Marktimplementierung von Wasserstofftechnologien übergangsweise ggf. auch blauer oder türkiser Wasserstoff zweckmäßig sei, sofern die CO<sub>2</sub>-Bilanzierung nach LCA-Standards positiv ausfällt. Für Investoren würde dies einen Einstieg attraktiver machen. Mittel- und langfristig sollte es jedoch grüner Wasserstoff sein. Was die Quellen für den Kohlenstoff betrifft, der für die Produktion vieler synthetischer Kraftstoffe gebraucht wird, so werden industrielle Punktquellen überwiegend kritisch gesehen; solche sollten höchstens für den frühen Markthochlauf genutzt werden, aber schon in der nächsten Dekade

nicht mehr erlaubt sein. Daneben wird Biogas als weitere alternative Kohlenstoffquelle genannt, allerdings nicht basierend auf Anbaubiomasse, die in Flächenkonkurrenz zur Nahrungsmittelproduktion steht.

### Markteinführung und mögliche Unterstützungsmaßnahmen

Unter den Interviewten besteht Einigkeit darüber, dass das Thema Power-to-X politisch weiter vorangetrieben werden muss, was auch die Wasserstofftechnologie und -wirtschaft miteinschließt. Derzeit habe man es noch mit einem Henne-Ei-Problem zu tun, weil sowohl ein Mangel an **Produktionsanlagen** als auch eine zu geringe Zahl von Kraftstoff-Abnehmern als wechselseitige Hemmnisse wirkten. Am Ende müssten synthetische Kraftstoffe sich preislich den fossilen Kraftstoffen annähern, was eben auch eine steigende Produktionsmenge der synthetischen Kraftstoffe voraussetze; ohne politische Unterstützung werde das nicht machbar sein. Bei den Produktionsanlagen müsse man die Ökonomie noch im Detail bilanzieren und noch einige Fragen klären (wo gibt es ggf. Engpässe, auf der Input- oder der Output-Seite, bei Transport oder Logistik?). Fördermittel blieben weiterhin notwendig, auch wenn es aktuell schon einiges gebe. Eine Herausforderung sei aber dann auch die Übergangsphase nach Auslaufen einer Förderung. Damit **Förderungen** nicht so abrupt enden, sollten Fördervolumina besser über längere Zeiträume verteilt werden. Des Weiteren wird der Wunsch geäußert, dass die Politik auch „80 %-Lösungen“ fördern sollte, also stärker die Forschung an Zwischenschritten in der Technologieentwicklung berücksichtigen und unterstützen sollte, auch wenn damit z. B. noch nicht sofort Null-Emissionschiffe möglich sind.

Bis zu einer verbreiteten praktischen Nutzung synthetischer Kraftstoffe werde es noch Zeit brauchen. Der Umstieg werde über eine längere Phase mit zunehmender Beimischung des synthetischen zum fossilen Kraftstoff erfolgen. Ab ca. 2030 sei mit nennenswerten Beimischungen der synthetischen Kraftstoffe zu rechnen. Wenn die Kraftstoffwahl auf synthetisches Methan falle, bilde der in den vergangenen Jahren begonnene Ausbau der LNG-Infrastruktur (inkl. entsprechender Motorentchnik, Bunkerschiffe etc.) gute Voraussetzungen. Mit den damit gesammelten Erfahrungen, z. B. auch bei den Schiffsbesatzungen, könne man später ohne große Probleme die Prozesse von fossilem LNG auf synthetisches Flüssiggas umstellen. So sei es auch positiv zu bewerten, dass ein paar große Kreuzfahrtreedereien nur noch LNG-Schiffe produzierten. Viele deutsche Fähr-Reedereien wiederum seien recht innovativ und könnten sich vorstellen, beim Antrieb in Richtung Methanol zu gehen, vorausgesetzt es werde bezahlbar (bei Fähren machten Brennstoffkosten ca. 80 % der Betriebskosten aus). **Planungssicherheit** sei ein ganz wichtiger Aspekt für Schiffsbauer und -betreiber, „man muss über Jahrzehnte planen können“. Gefordert seien Verlässlichkeit durch verbindliche Regelwerke und ausreichende Klarheit darüber, in welchen Mengen und zu welchen Preisen ein bestimmter Kraftstoff in den kommenden Jahren verfügbar sein wird. Es wird aber auch auf eine Besonderheit der deutschen Reedereien-Landschaft hingewiesen: Viele Reeder seien nicht die Betreiber ihrer eigenen Schiffe, sondern vermieten / verchartern diese; der Vercharterer trage zwar die Investitionskosten für das Schiff (inkl. der Antriebstechnik), aber der Charterer kaufe den Treibstoff ein und bestimme somit, was getankt wird.

In der **Schiffsbaufinanzierung** deute sich immerhin eine Entwicklung in Richtung Nachhaltigkeit an. Eine der wichtigsten (wenn nicht die wichtigste) Bank für die Finanzierung von Schiffsbauten habe vor einiger Zeit angekündigt, bald nur noch nachhaltig angetriebene Schiffe finanzieren zu wollen.

Als weitere Möglichkeiten der Förderung für eine Schifffahrt mit alternativen Antrieben bzw. Treibstoffen werden lokale oder regionale **Einfahrtbeschränkungen** für Schiffe mit hohen THG- und / oder Luftschadstoff-Emissionen zur Sprache gebracht. Einige sehen darin aber „keinen großen Hebel“, da die Hafenstädte untereinander im Wettbewerb stünden. Bei rein lokalen Vorgaben komme es nur zum Ausweichen auf andere Hafenstädte. So etwas müsste daher schon auf höherer Ebene allgemeinverbindlich geregelt werden. Einzelne Anreizsysteme gebe es auch schon weltweit (Environmental Ship Index), mit Vergünstigungen (Hafenrabatte) für saubere Schiffe. Als weiteres Beispiel werden die sog. Green corridors genannt, d.h. Routen, die von Vorreitern im klimaverträglichen Schiffsbetrieb genutzt würden (Staaten, Häfen, Reedereien), welche sich auf bestimmte Anforderungen verständigt hätten. Zu diesen Anforderungen könnte zukünftig auch die Nutzung THG-neutraler Schiffsantriebe bzw. Treibstoffe gehören.

### **8.3.1 Nutzendenpräferenzen**

#### **Fokusgruppen zur Akzeptanz erneuerbarer Kraftstoffe im Wirtschaftsverkehr**

Die Befragung von Fokusgruppen im Wirtschaftsverkehr ergab, dass die Nutzendenakzeptanz im Wesentlichen von dem Kraftstoffverbrauch, dem Angebot von alternativen Antriebstechnologien und Nebeneffekten bei der Herstellung abhängt. Zu den Nebeneffekten zählen unter anderem der Ressourcenverbrauch bei der Erzeugung dieser Kraftstoffe sowie die politischen Verhältnisse in den Erzeugungsländern. Für eine genauere Bewertung der Nebeneffekte werden jedoch präzisere Informationen über die unterschiedlichen Kraftstoffherstellungspfade benötigt. Insgesamt konnte der Lkw-Fernverkehr als early adopter für erneuerbare Kraftstoffe identifiziert werden. Voraussetzung für die Akzeptanz ist jedoch, dass langfristige Perspektiven geschaffen und die politische Unterstützung gesichert wird. Politische Maßnahmen sollten dabei unterschiedliche Zielgruppen berücksichtigen. Die Ergebnisse wurden im Rahmen eines wissenschaftlichen Artikels mit dem Titel „*Renewable fuels in commercial transportation: Identification of early adopter, user acceptance, and policy implications*“ im Journal *Case Studies on Transport Policy* veröffentlicht [Frenzel et al. 2021].

#### **Befragung zur Akzeptanz von erneuerbaren Kraftstoffen im Pkw-Personenverkehr**

Die Befragung von privaten Pkw-Besitzerinnen und -Besitzern zeichnet ein gemischtes Meinungsbild zu erneuerbaren Kraftstoffen. Während bei manchen Fragen sehr polarisierende Einstellungen zu sehen sind, kann auch eine gewisse Unsicherheit festgestellt werden. Besonders finanzielle Vergünstigungen, vor allem jene beim Kraftstoffpreis, der Kfz-Steuer oder der Umrüstung von Fahrzeugen, werden als attraktive Fördermaßnahmen bewertet. Weiterhin konnte durch die Analyse der durchgeführten Stated-Choice Befragung festgestellt werden, dass vor allem der Kraftstoffpreis eine wichtige Rolle bei der Kraftstoffwahl spielt. Für umweltbewusste Personen spielen zudem die CO<sub>2</sub>-Emissionen und der Ressourcenverbrauch eine entscheidende Rolle. Um die Kosten für eine Umrüstung möglichst gering zu halten und die

Interoperabilität von erneuerbaren Kraftstoffen mit Bestandsfahrzeugen zu gewährleisten, sollten die Eigenschaften von erneuerbaren Kraftstoffen denen von konventionellen Kraftstoffen möglichst entsprechen. Falls ein bipolarer Betrieb der Fahrzeuge mit erdölbasierten und erneuerbaren Kraftstoffen nicht möglich ist, ist es für die Akzeptanz dieser Kraftstoffe von entscheidender Bedeutung, dass eine flächendeckende Verfügbarkeit von erneuerbaren Kraftstoffen gewährleistet wird. Weiterhin wird empfohlen, erneuerbare Kraftstoffe im Vergleich zu konventionellen Kraftstoffen zu einem vergleichbaren oder günstigeren Preis anzubieten. Um der Unsicherheit der Nutzenden zu begegnen wird empfohlen, Kraftstoffherstellung, -verfügbarkeit und -kompatibilität transparent und einheitlich zu kommunizieren. Ein umfassender Bericht ist auf der Internetseite des DLR [Nguyen et al. 2021] zu finden.

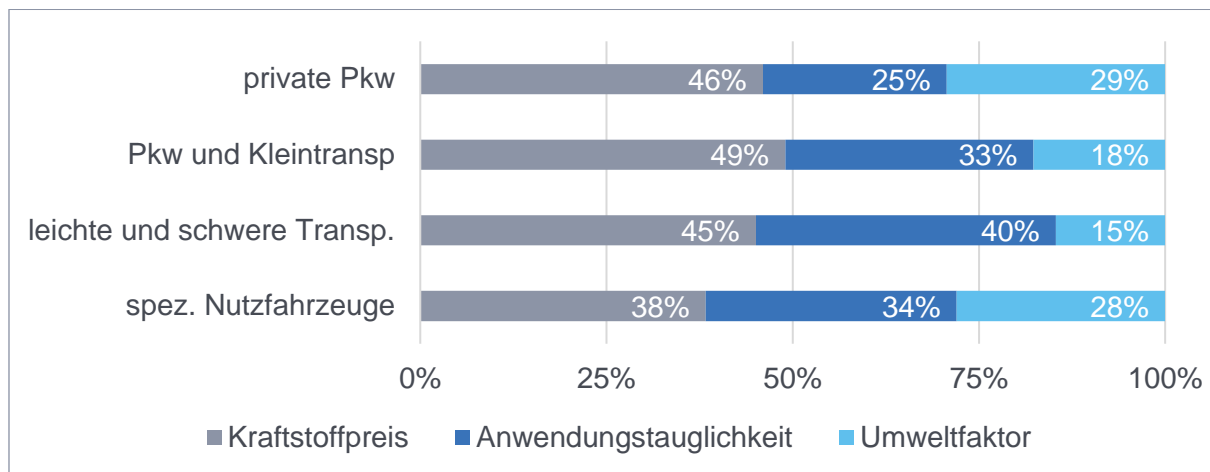
### **Erfassung von Nutzungsmustern von Pkw und dem damit verbundenen Tankverhalten von Pkw in Deutschland**

Die Erfassung von Pkw-Nutzungsmustern, und dem damit verbundenen Tankverhalten, wurde im Frühjahr 2021 durchgeführt. Insgesamt 439 Personen haben das Fahrtenbuch nach einer Woche zurückgeschickt, wovon 383 Personen ebenfalls das Tankbuch in einem Zeitraum von acht Wochen ausgefüllt haben. Es konnten ca. 5.900 Fahrten und ca. 1.700 Tankvorgänge verzeichnet werden. Im Durchschnitt haben die Probandinnen und Probanden in ihrer Berichtswoche ungefähr acht Fahrten zurückgelegt mit einer durchschnittlichen Fahrtenlänge von 18 Kilometern und einer durchschnittlichen Unterwegszeit von 26 Minuten. Weitere Ergebnisse zeigen, dass die häufigsten Fahrten an einem Freitag und die wenigsten an einem Sonntag durchgeführt wurden. Die meist genannten Wegezwecke sind neben dem Heimweg, der Arbeitsweg, Einkauf und Erledigungen und Freizeitwege. Knapp die Hälfte der Wege der jeweiligen Wegezwecke Einkauf und jemanden holen / bringen finden im Nahraum unter fünf Kilometern statt.

Innerhalb von acht Wochen konnten ca. vier Tankvorgänge pro Person verzeichnet werden und eine durchschnittlich zurückgelegte Entfernung von 2.150 Kilometern. Darüber hinaus zeigen die Ergebnisse, dass über ein Drittel der Probandinnen und Probanden ihre Tankvorgänge mit dem Wegezweck Einkauf verbinden. 18 Prozent der Probanden und Probandinnen haben mindestens zwei Wegezwecke (zusätzlich zum Tanken) für die Tankvorgänge miteinander verbunden. Personen, die innerhalb der Berichtswoche überdurchschnittlich viele Fahrten und Kilometer zurückgelegt haben, haben auch überdurchschnittlich mehr Tankvorgänge aufweisen können.

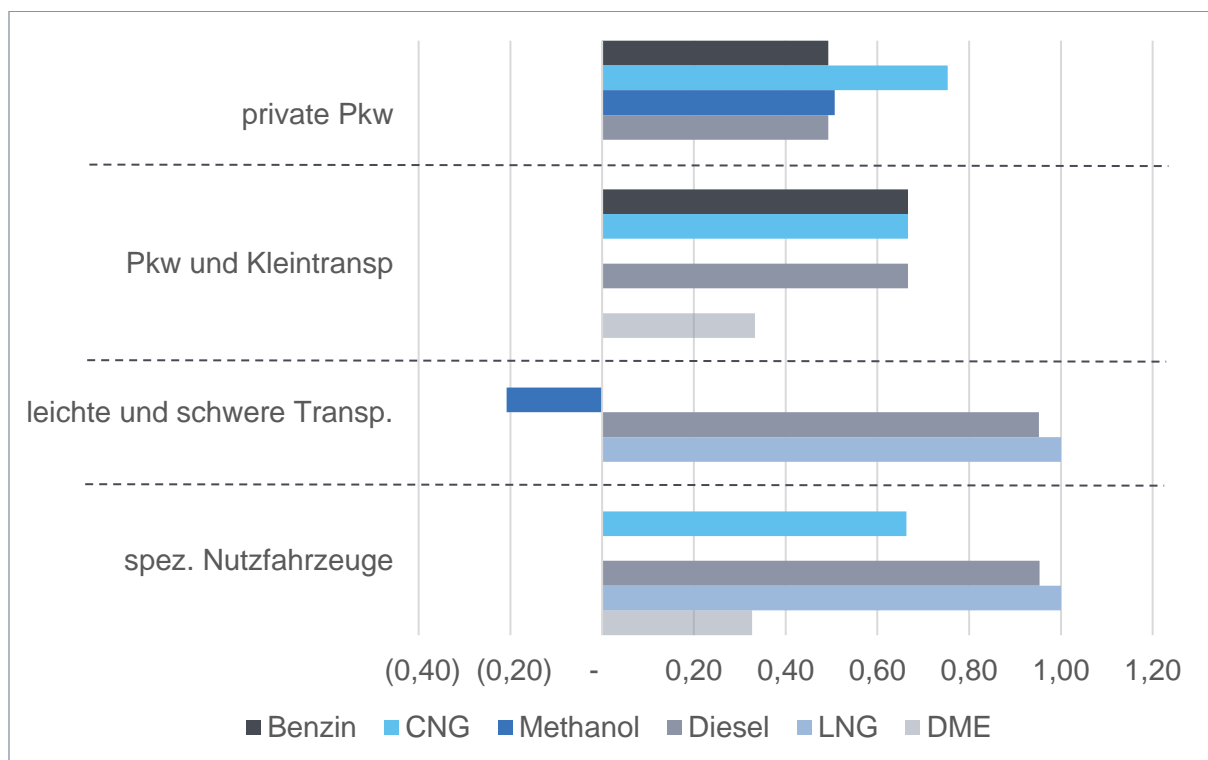
### **Akzeptanzindikatoren**

Die zuvor gewonnenen Erkenntnisse wurden zusammengeführt, um die Relevanz unterschiedlicher Kraftstoffeigenschaften für die verschiedenen Nutzendengruppen zu bewerten. Die Kraftstoffeigenschaften konnten anschließend den identifizierten Akzeptanzfaktoren zugeordnet werden. Dieses Vorgehen erlaubt die Bewertung der generischen Kraftstoffpfade für die untersuchten Nutzendengruppen, ohne andere Antriebstechnologien, wie Wasserstoff- oder Elektroantriebe zu berücksichtigen.



**Abbildung 8-8:** Relevanz der Akzeptanzfaktoren für unterschiedliche Nutzendengruppen

In Abbildung 8-8 ist die Relevanz der Akzeptanzfaktoren für unterschiedliche Nutzendengruppen abgebildet. Insgesamt ist zu sehen, dass die Kraftstoffkosten, unter allen betrachteten Eigenschaften über alle Nutzendengruppen, am wichtigsten sind. Die Gewichtungen liegen dabei alle bei über 38 %. Insbesondere für Flottenbetreibende von Pkw und Kleintransportern spielen wirtschaftliche Aspekte in den Kosten eine große Rolle, was auch in Verbindung mit der Bestandsfahrzeugnutzung und den Umrüstkosten steht. Die Anwendungstauglichkeit ist vor allem als Resultat aus der Relevanz von Reichweite und Umrüstkosten für Flottenbetreibende von Leicht- und Schwertransporten wichtig, bei denen hohe Fahrleistungen und Effizienzverluste durch Tankstopps entscheidend für die Wirtschaftlichkeit sind. Da diese Fahrzeuge auch international unterwegs sind, ist es für diese Gruppe wichtig, dass erneuerbare Kraftstoffe flächendeckend, auch im Ausland, verfügbar sind. Flotten mit speziellen Nutzfahrzeugen, wie z.B. Müllwagen, nutzen häufig eine Tankstelle auf dem eigenen Betriebshof. Für die Betreibenden dieser Flotten ist daher vor allem die Drop-In-Fähigkeit der Kraftstoffe als Anwendungskriterium wichtig. Da diese Betreibenden häufig öffentlichen Einrichtungen angehören, werden bestimmte Klimaziele zur Erreichung vorgegeben, was zu einer vergleichbar hohen Bewertung von Umweltfaktoren führt. Für private Pkw-Nutzende stehen erneuerbare Kraftstoffe aufgrund der Fahrprofile und der Relevanz der Preiskomponente in besonderer Konkurrenz zu alternativen Antriebsformen. Drop-In-fähige erneuerbare Kraftstoffe eignen sich jedoch, um den Umwandlungsprozess zu begleiten.



**Abbildung 8-9:** Bewertung der generischen Kraftstoffpfade anhand der ausgewerteten Akzeptanzfaktoren

Die Bewertung der generischen Kraftstoffpfade für die untersuchten Nutzendengruppen (siehe Abbildung 8-9) zeigt, dass vor allem die günstigen Kraftstoffe hier einen großen Vorteil haben. Das liegt im Wesentlichen in der Tatsache begründet, dass die Preiskomponente bei allen Nutzendengruppen die wichtigste Rolle spielt (siehe Abbildung 8-8).

## 9 Strategien und regulatorische Rahmenbedingungen für die Markteinführung

Mit Blick auf die Inverkehrbringung von synthetischen Kraftstoffen ist zu erwarten, dass eine Marktdurchdringung dieser neuartigen Kraftstoffe, gegen die am Markt etablierten fossilen Kraftstoffe, nicht ohne den gezielten Einsatz flankierender Maßnahmen möglich sein wird. Dies begründet sich einerseits mit den Bedingungen am Markt, in dem die verfügbaren fossilen Kraftstoffe bislang mengenmäßig in der Lage waren, die Mobilitätsbedürfnisse der Bürger\*innen zu decken. Weiterhin steht eine gewachsene, auf sie zugeschnittene Infrastruktur und Regulierung zur Verfügung. Die Bedarfe und Abnahmebereitschaft durch Verbraucher sind mehr oder minder bekannt oder zumindest gut abschätzbar, und auch Erzeuger wie Anbieter sind fest etabliert. Andererseits liegt dies an den Eigenschaften von synthetischen Kraftstoffen, die mindestens in der Anfangsphase eines Markthochlaufes teurer sein werden, teilweise anders zu handhaben sind etc. Zumindest kurzfristig ist unter diesen Umständen nicht damit zu rechnen, dass sich synthetische Kraftstoffe von selbst am Kraftstoffmarkt durchsetzen werden. Die angeführten sowie weitere strukturelle Gründe stehen dem entgegen.



Gleichwohl kann ein gesellschaftspolitisches Interesse daran bestehen, synthetische Kraftstoffe in bestimmten Bereichen als ein Bestandteil einer übergeordneten Strategie zur Defossilisierung des Verkehrssektors einzusetzen, um die Nutzung klimaschädlicher Kraftstoffe, in deren Kosten die von ihnen verursachten Umweltschäden nicht eingepreist sind, zu beenden. Dort wo dies der Fall sein soll, bedarf es Mechanismen, welche die strukturellen wie inhärenten Nachteile von synthetischen Kraftstoffen ausgleichen, um ihnen so eine zügige Etablierung am Markt zu ermöglichen. Derartige Mechanismen werden im Projekt BEniVer allgemein als Markteinführungsmechanismen (MEM) bezeichnet.

Der Aufbau dieses Kapitels zur Markteinführung ist wie folgt: Im anschließenden (eher theoretischen) Abschnitt 9.1 wird zuerst erläutert, welche gesellschaftlichen Interessen bestehen können, synthetische Kraftstoffe politisch zu flankieren; danach erfolgt eine politikwissenschaftliche Einordnung von Markteinführungsmechanismen und ihrer – jeweils anwendungsbezogenen - Konzeption. Im zweiten Abschnitt 9.2 werden in empirischer Form die bestehenden Kraftstoffmärkte sowie die bisherigen Voraussetzungen in Bezug auf den Ausbau der erneuerbaren Energien und den Aufbau von Erzeugungskapazitäten weltweit untersucht. Ein weiterer Abschnitt 9.3 befasst sich mit der möglichen Anwendung von Markteinführungsmechanismen im internationalen Bereich, wo eine dynamisch konzipierte Typologie von Ländern entworfen wird, für die jeweils angepasste Strategien eingesetzt werden können. Ein vierter Abschnitt 9.4 analysiert die wesentlichen bestehenden regulatorischen Rahmenbedingungen für den Aufbau neuer Märkte für synthetische Kraftstoffe und skizziert, welches die wesentlichen Ansatzpunkte für robuste und nachhaltige Marktstrukturen für diese Märkte sind. Zuletzt 9.5 werden die wesentlichen Schlussfolgerungen aus diesem Kapitel für die konkrete zukünftige Ausgestaltung von Markteinführungsmechanismen dargestellt.

## 9.1 Methodische Einordnung zur Konzeption von Markteinführungsmechanismen

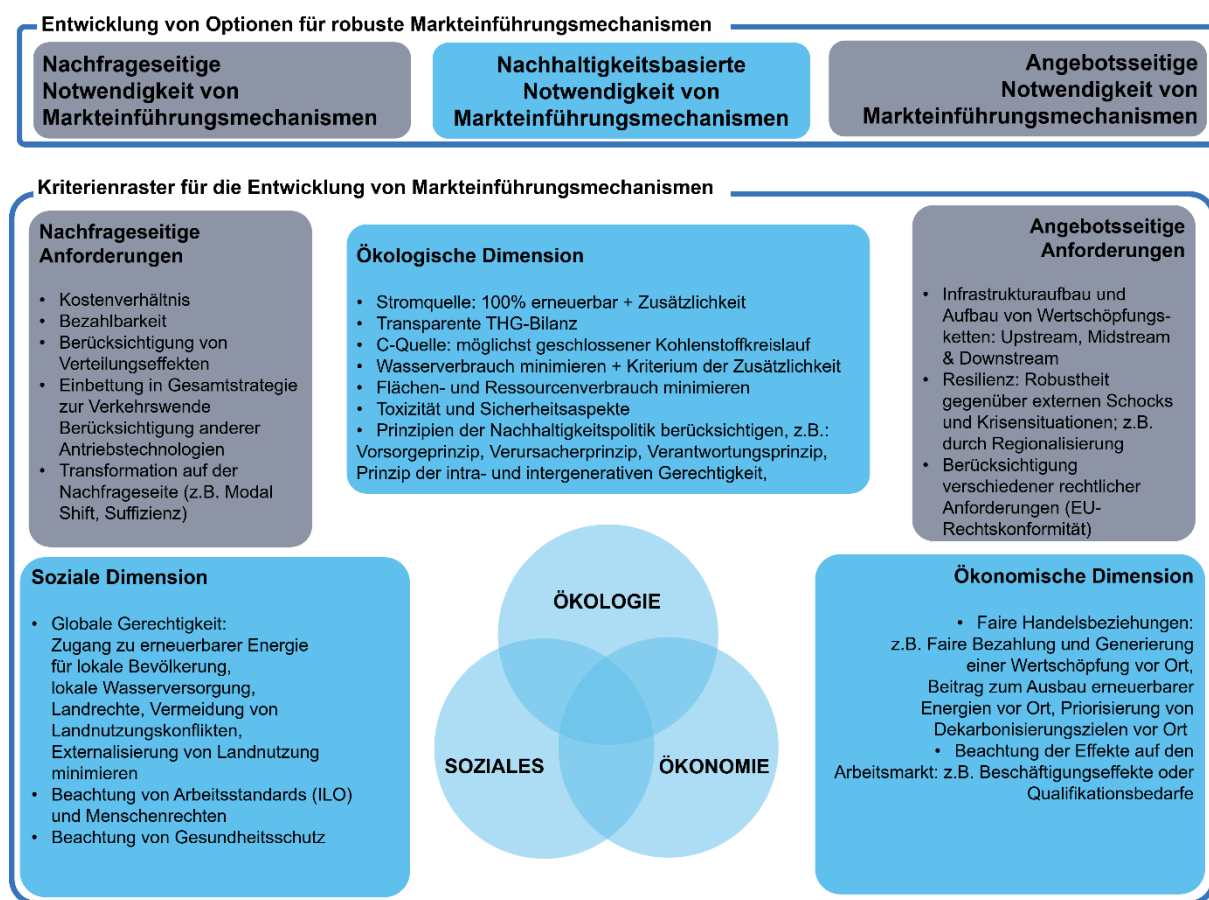
Wie oben beschrieben, kann ein gesellschaftspolitisches Interesse daran bestehen, synthetische Kraftstoffe in bestimmten Bereichen als ein Bestandteil einer übergeordneten Strategie zur Defossilisierung des Verkehrssektors einzusetzen. Dieses Interesse und die übergeordneten gesellschaftlichen Prämissen werden im Folgenden erläutert.

### 9.1.1 Synthetische Kraftstoffe als Teil der Energiewende im Verkehr

Im Jahr 2015 hat sich die Weltgemeinschaft die 17 Ziele der Nachhaltigen Entwicklung („Sustainable Development Goals“, kurz „SDGs“) gesetzt, die sie bis zum Jahr 2030 umsetzen will, um weltweit Frieden und das Wohlergehen der Menschen und unseres Planeten als Ganzes zu sichern [UN 2022b]. Dabei ist zu beachten, dass die einzelnen SDGs sich in das Gesamtziel der nachhaltigen Entwicklung einfügen sollen, zu dem der gesamte Kanon der 17 Einzelziele aus den Bereichen Ökologie, Ökonomie und gesellschaftliche Entwicklung gehört. Dazu zählt auch das SDG 13: „Take urgent action to combat climate change and its impacts“ [UN 2022a].

In der Bundesrepublik Deutschland werden die SDGs im Rahmen der Deutschen Nachhaltigkeitsstrategie umgesetzt, indem sie im Rahmen des Verwaltungshandelns und der Gesetzgebung sowie in der internationalen Zusammenarbeit angewendet werden sollen [BMUV 2022; Bundesregierung 2021a].

Die politisch-gesellschaftliche Umsetzung des SDG 13 (wie auch der SDGs insgesamt) lässt sich gemäß einer von der OECD erstellten Typologie der öffentlichen Innovationspolitiken als „mission oriented innovation“ einteilen, da ein eindeutiges Ergebnis erzielt werden soll (die Begrenzung der globalen Erderhitzung auf weniger als 1,5°C gemäß dem Pariser Klimaabkommen), für welches politische „Missionen“ ausformuliert werden, die in der Summe zur Erreichung der übergeordneten Zielstellung dienen sollen [OECD 2021, S. 4]. Abbildung 9-1 zeigt, wie die verschiedenen SDGs in die Entwicklung der Markteinführungsmechanismen integriert werden (vgl. hierzu auch Abschnitt 3.7, in dem die daraus entwickelten Bewertungskriterien bzgl. der Angemessenheit von Markteinführungsmechanismen für diverse Kraftstoffe beschrieben werden).



**Abbildung 9-1:** Kriterienraster für die Entwicklung von Markteinführungsmechanismen

In dieser Hinsicht kann die „Energiewende im Verkehr“ als eine dieser Missionen definiert werden, welche durch unterschiedliche Projekte im Bereich der Forschung, Technologie und Innovation erreicht werden sollen<sup>24</sup>. Dass der Bereich einer politischen Flankierung bedarf, hat zuletzt auch der Expertenrat für Klimafragen in seinem Zweijahresgutachten für die Bundesregierung [ERK 2022, 181ff.] festgestellt, da die Abweichung zwischen dem Zielpfad für den

<sup>24</sup> Vgl. analog hierzu [Mazzucato 2018, S. 22], die z. B. die Erreichung des Ziels von 100 klimaneutralen Städten als Unterziel des SDG13 darstellt.

Verkehrssektor und den Entwicklungen der vergangenen Jahre sowie den resultierenden Projektionen bis zum Jahr 2030 hier besonders hoch ist. Gleichzeitig erreichen, laut dieses Gremiums, die aus den wesentlichen Maßnahmen der Bundesregierung, zur Reduktion der Emissionen im Verkehrssektor, resultierenden Fortschritte aktuell bei weitem nicht die notwendige Geschwindigkeit.

Dieses vom Expertenrat für Klimafragen aufgezeigte Defizit verweist auf ein weiteres Charakteristikum einer „mission oriented innovation“ bzw. grundsätzlich von „mission oriented policies“: Diese betreffen gesamtgesellschaftliche Zielstellungen, die einen umfassenden gesellschaftlichen Wandel – der ein breites Spektrum an unterschiedlichsten Akteuren einbindet – bedingen und insbesondere das Handeln des Staates erfordern. Dem Staat obliegt es zuvorderst, den Wandel zu koordinieren und als der wesentliche Akteur zu fungieren, der im Sinne der Zielerreichung neue Märkte und Marktstrukturen schaffen kann [Kattel et al. 2018, S. 6]. Hierzu werden sog. Markteinführungsmechanismen benötigt.

Die benötigten Mechanismen sind jedoch davon abhängig, ob die zu entwickelnden Güter bereits Marktreife haben bzw. ob die Güter zwar grundsätzlich hergestellt werden können, aber die entsprechenden Märkte erst aufgebaut werden müssen oder ob beides bereits vorhanden ist. Inwieweit dies für die in BEniVer untersuchten synthetischen Kraftstoffe der Fall ist, kann anhand der Methoden der Innovationsökonomie, insb. der sog. *TIS-Analyse*, beurteilt werden. Diese wird im Folgenden vorgestellt.

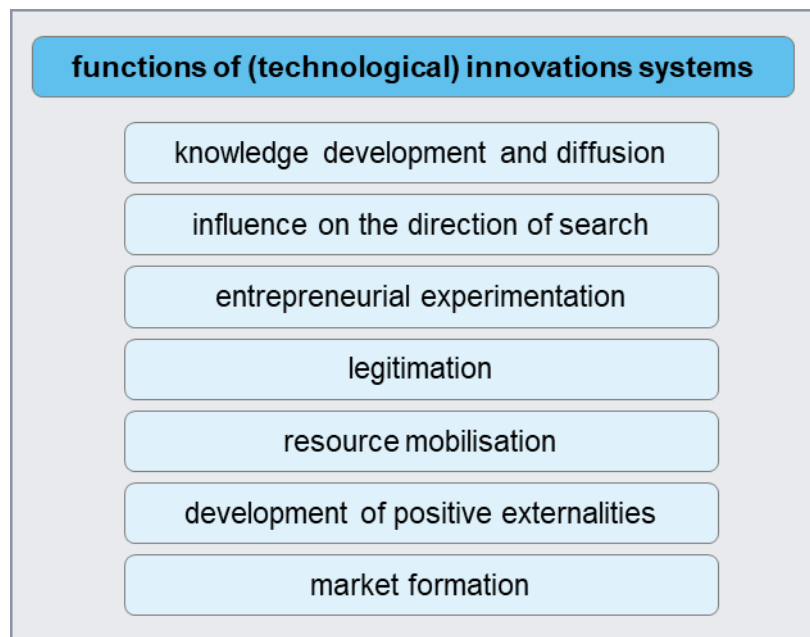
### **9.1.2 Bestimmung der notwendigen Maßnahmen zur Markteinführung anhand der Analyse „technologischer Innovationssysteme“**

Wie die Innovationsökonomie herausgearbeitet hat, sind Innovationen - wie die Erreichung der Marktreife und Marktdurchdringung von synthetischen Kraftstoffen - keine Einzelleistungen, sondern werden erst in einem kollektiven Umfeld möglich, die als „technologisches Innovationssystem“ (kurz „TIS“) bezeichnet werden. Die Weitergabe von Wissen und die Ausbreitung von Technologie treiben Innovation als Prozess voran. Daraus resultiert, dass dem Zusammenspiel der Akteure ein großes Gewicht beizumessen ist, wenn theoretische Konzepte oder Technologien in einem recht frühen Entwicklungsstadium in wirkmächtige und marktreife technologische Komponenten überführt werden sollen.

Ein TIS kann entsprechend bestimmt werden als „*the set of actors and rules that influence the speed and direction of technological change in a specific technological area*“ [Hekkert et al. 2011, S. 3]. Erst die Handlungen der Akteure in ihrer Gesamtheit sind ausschlaggebend dafür, ob eine Innovation bzw. ein neues TIS sich in einem weiteren gesellschaftlichen Kontext etablieren kann oder auf ein Nischendasein beschränkt bleibt [Hekkert et al. 2011, S. 5]. Warum das so ist, lässt sich mittels der von Hekkert identifizierten sieben Funktionen des TIS aufzeigen (vgl. Tabelle 9-1), anhand derer der Erfolg eines TIS gemessen werden kann.

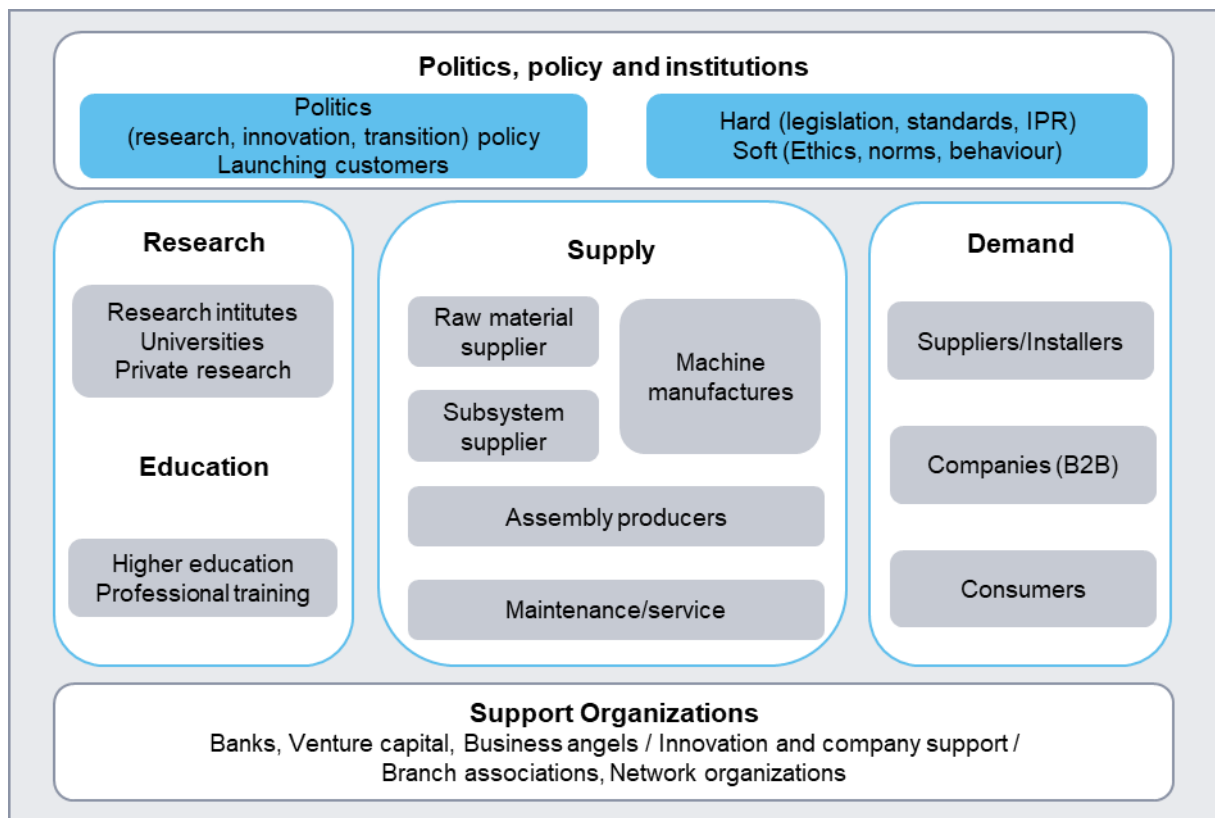
1. „Knowledge development and diffusion“ bedeutet eine größere Anzahl von – bestenfalls sehr vielfältigen – Akteuren (die im weitesten Sinne synthetische Kraftstoffe erforschen und produzieren) sowie einen größeren Zustrom von Wissen verschiedener Disziplinen in das TIS, was seine Innovationskraft steigern und seine Grenzen ausdehnen kann.

2. Um die Ausweitung eines TIS und seines Einflusses dreht sich gleichsam die Funktion „Influence on the direction of search“, in der zum Ausdruck kommt, welche Faktoren dazu führen, dass weitere Akteure in die Aktivitäten des TIS integriert werden (wodurch die Wissensbasis über synthetische Kraftstoffe erweitert wird).
3. Die zunehmende Zahl von Akteuren vergrößert nicht nur die Wissensbasis auf der theoretischen Ebene, sondern befördert in gleicher Weise die praktische Umsetzung dieses Wissens im Sinne von „entrepreneurial experimentation“. Dies ist insofern zentral für das TIS, weil nur die konkrete Anwendung eine Weiterentwicklung der Technologie erlaubt. In dem sich einige Konzepte in der Praxis als Fehlschläge erweisen, anderen hingegen Erfolg beschieden ist, findet ein sozialer Lernprozess statt, durch den Unsicherheiten reduziert werden und konkrete Anwendungen sich etablieren können. Ohne diese lernende Umsetzung (d. h. die konkrete Herstellung synthetischer Kraftstoffe und ggf. die Hochskalierung und Spezialisierung ihrer Produktion) würde die Entwicklung des TIS zwangsläufig zum Stillstand kommen.
4. Genauso zentral ist der parallel laufende Prozess von „legitimation“, der einerseits potenzielle weitere Marktteilnehmer davon überzeugen soll, ihre Ressourcen in das TIS einzuspeisen, andererseits aber darauf zielen muss, gesellschaftlichen Erwartungshaltungen zu entsprechen und in dieser Weise gesellschaftliche Bedürfnisse zu befriedigen oder zu erzeugen, um für die vom TIS bereitgestellten Produkte mit zusätzlichen Ressourcen ausgestattet zu werden. Legitimität - insbesondere gegen den Widerstand dominanter Technologiesysteme - aufzubauen, kann sich als sehr zeitraubendes Unterfangen erweisen, das gezielt vorangetrieben werden muss. Im Zuge dieses Prozesses ein größeres Spektrum an Akteuren zu überzeugen und für das TIS zu gewinnen, bedeutet auch steigende Chancen, durch zunehmende Kapazitäten mehr Einfluss hinsichtlich der gesellschaftlichen Akzeptanz geltend machen zu können (was insb. hier der Fall ist, da synthetische Kraftstoffe in die etablierten Märkte fossiler Kraftstoffe eindringen, gleichzeitig aber auch ihre jeweilige Notwendigkeit beweisen sollen).
5. Dadurch kann dann eine umfangreichere „resource mobilisation“ erfolgen, sowohl was Arbeitskräfte, Geld als auch weitere Mittel (für die gesamte Wertschöpfungskette synthetischer Kraftstoffe) anbelangt.
6. In der Folge gelingt das „development of positive externalities“ besser, was eine Diversifizierung des TIS durch die neuen Marktteilnehmer mit sich bringt (die auf die gesellschaftlich und monetär honorierten vorherigen Entwicklungsschritte aufbauen können) und sich positiv auf alle anderen Funktionen auswirkt.
7. Alles in allem erlaubt dies einem TIS bestenfalls die „market formation“ (d. h. die Markteinführung synthetischer Kraftstoffe) komplett zu durchlaufen und von der Nische zum Massenmarkt heran zu reifen [Bergek et al. 2008].

**Tabelle 9-1:** Funktionen eines TIS (in Anlehnung an [Hekkert et al. 2011, S. 10])

Die wechselseitigen Beeinflussungen der Funktionen untereinander, sind dabei noch weit komplexer als hier dargestellt. Was jedoch deutlich wird, ist die hohe Relevanz der Akteure in der Entwicklung eines TIS zur Schaffung der Marktreife und Marktdurchdringung von synthetischen Kraftstoffen und sind die Vorteile, die eine breite Palette von Akteuren dabei bedeuten.

Tatsächlich ist das mögliche Spektrum von Akteuren, die in ein TIS sinnvoll eingebunden werden können und teils müssen, umfassend [Hekkert et al. 2011, S. 5]. Neben verschiedensten Unternehmen entlang der Wertschöpfungskette, betrifft das etwa Universitäten und Forschungseinrichtungen, Interessenverbände, öffentliche Institutionen, Finanzakteure, Standardisierungsorganisationen, Gruppen von Anwendern und viele mehr [Bergek et al. 2008]. Einige Arten von Akteuren, die häufig in einem TIS zu finden sind, zeigt Abbildung 9-2.



**Abbildung 9-2:** (Typische) Akteursstruktur eines TIS (in Anlehnung an [Hekkert et al. 2011, S. 5])

Vor diesem Hintergrund steht die Konzeption von Markteinführungsmechanismen (für synthetische Kraftstoffe ebenso wie für andere neue Technologien) vor einer dreifachen Herausforderung:

Erstens muss sie sich an der Reife und Fähigkeit zur notwendigen Funktionserfüllung des jeweiligen technologischen Innovationssystems orientieren. TIS-Analysen kennen unterschiedliche Phasenmodelle, nach denen die Entwicklung eines Marktes unterteilt werden kann. Die Phase, in der sich ein Markt befindet, hat Auswirkungen darauf, welchen Funktionen eines TIS besondere Bedeutung zukommt, weswegen ein richtiges Verständnis der Marktsituation für die Analyse von zentraler Bedeutung ist. Bergek et al. unterteilen sehr übersichtlich in eine Entwicklungsphase und eine Wachstumsphase. Es wird davon ausgegangen, dass die Entwicklungsphase sich über wenigstens ein Jahrzehnt erstreckt, nicht selten aber über mehrere. In dieser Zeit herrscht große Unsicherheit, Marktteilnehmer versuchen, sich in Beziehung zu setzen und ihre jeweilige Rolle auszufüllen. Die Möglichkeit zu experimentieren ist von zentraler Bedeutung [Bergek et al. 2008]. [Hekkert et al. 2011, S. 9] unterteilen vier Marktphasen:

- zuerst die Pre-development phase (Hier ist knowledge development entscheidend),
- gefolgt von der Development phase (wo v. a. entrepreneurial experimentation nötig ist),
- an welche die Phase des take-off anknüpft und
- schließlich geht der Markt in eine acceleration phase über.

Zweitens muss sie in dem Bewusstsein erfolgen, dass für eine erfolgreiche Markteinführung die Bedürfnisse einer Vielzahl heterogener Akteure gerade in ihrem Zusammenspiel bedacht und abgewogen werden müssen. Drittens wird es selbst Teil der Strategie sein müssen, diese Vielfalt an Akteuren aktiv für die Markteinführung, wenn nicht gar erst die Produktentwicklung, zu gewinnen und möglichst zu steigern. Daher sind Markteinführungsmechanismen mehr als nur Korrekturmaßnahmen an bereits bestehenden, in Teilen dysfunktionalen Märkten. Dies spiegelt auch die im Folgenden hergeleitete Definition der Markteinführungsmechanismen wider.

### **9.1.3 Zur Definition von Markteinführungsmechanismen**

Die gezielte Einführung von synthetischen Kraftstoffen verfolgt, wie oberhalb skizziert, die Absicht, als Teil einer Defossilisierungsstrategie für den Verkehrssektor, zur Einhaltung der Klima- und Nachhaltigkeitsziele der Bundesrepublik Deutschland, beizutragen. Aus dieser Zielstellung heraus handelt es sich bei diesen Maßnahmen zur Markteinführung unmittelbar um Instrumente der Politik<sup>25</sup>, welche gesellschaftlich bzw. politisch gesetzte Ziele realisieren sollen.

Die Definition und inhaltliche Bestimmung von Markteinführungsmechanismen kann daher vom Begriff der Politikinstrumente her entwickelt werden. Allerdings steht dafür keine allgemeingültige Definition zur Verfügung, die unter allen Umständen Geltung hätte. Eine absolut simple Definition könnte lauten, dass Politikinstrumente Mittel zur Erreichung gesellschaftlicher Ziele bzw. zur Lösung von Problemen sind. Mit ihnen sollen Akteure dazu bewegt werden, in einer Weise zu handeln, die sie unbeeinflusst nicht wählen würden [van Nispen tot Pannerden 2011]. Michael Howlett beschreibt sie in diesem Sinne als Herrschaftstechniken, die auf staatliche Autorität rekurrieren [Howlett 2005]. Eine solche Bestimmung bleibt jedoch zu allgemein. Der Komplexität der Thematik angemessen, erscheint eher eine Anlehnung an Patrick Le Galès. Unter Politikinstrumenten werden hier Mittel verstanden, die in der Verbindung von technischen und sozialen Aspekten das Verhältnis von Verwaltung – als Akteur der Umsetzung politischen Willens – und Zivilgesellschaft regeln [Le Galès 2011]. Eine weitere mögliche Definition liefert Gjalt Huppes mit Blick auf die Umweltpolitik. Er begreift umweltpolitische Instrumente als strukturierte Aktivitäten, die darauf abzielen, andere Aktivitäten in der Gesellschaft auf umweltpolitische Ziele hin auszurichten. Dabei ordnen die Instrumente die Beziehungen zwischen den Akteuren, deren Verhalten sie in Bezug auf die umweltpolitischen Zielsetzungen anleiten. Insofern ist allen Instrumenten gemein, dass sie dazu dienen sollen, eine Verhaltensänderung herbeizuführen, die ohne ihren Einsatz nicht stattgefunden hätte [Huppes 2001].

Weiterhin erweist sich eine Definition der Generaldirektion Umwelt der Europäischen Kommission als instruktiv für die vorliegende Fragestellung. „Market pull instruments“ beschreibt sie als Instrumente mit dem Potenzial, aus Innovationsprozessen größere Vorteile zu generieren, indem sie Anreize für Produkte und Dienstleistungen mit spezifischen Eigenschaften setzen [EC DGE 2009]. Zusätzlich gilt, dass Innovationspolitik, insbesondere für radikale Innovationen, gebraucht wird, deren Marktfähigkeit nicht abzusehen ist [Kemp und Pontoglio 2011]. Da Politikinstrumente praktisch nie einzeln Verwendung finden, sondern gebündelt eingesetzt werden, sei abschließend noch eine Definition des Policy Mix angeführt. Nach Paula Kivimaa

<sup>25</sup> Politikwissenschaftlich gesprochen: Policy Instruments.

und Florian Kern lässt sich darunter eine spezifische Kombination von Politikinstrumenten fassen, welche explizit oder implizit zusammenspielen, um Innovationen zu befördern und dominante Systeme zu unterminieren [Kivimaa und Kern 2016]. Aus diesen Betrachtungen lässt sich folgende Definition von MEM im Projekt BEniVer ableiten:

#### *Definition von Markteinführungsmechanismen*

*Unter **Markteinführungsmechanismen (= MEM)** sind politische Mittel zu verstehen, deren Einsatz das Verhalten und die Beziehungen als relevant bestimmter Akteure untereinander auf die Verwirklichung klimapolitischer Ziele hin ausrichten, indem sie unter Berücksichtigung von Anforderungen der Nachhaltigkeit Anreize zur Produktion und gezielten Nutzung synthetischer Kraftstoffe in einem Ausmaß schaffen, das ohne ihren Einsatz gar nicht oder allenfalls über einen viel längeren Zeitraum hinweg zustande kommen würde. In Kombination zielen sie auf die weitestgehende Beendigung der Nutzung fossiler Kraftstoffe und sollen auf diesem Wege die Defossilisierung des Verkehrssektors ermöglichen.*

#### **9.1.4 Wissenschaftliche Fundierung der Konzeption von Markteinführungsmechanismen**

Die beachtliche Vielzahl der Akteure im Rahmen eines komplexen, gesellschaftlichen Subsystems wie des Verkehrssektors geht mit einer weiteren, zu berücksichtigenden Überlegung einher. Es wird nicht gelingen, die Herausforderung, die solch eine Markteinführung bedeutet, mit einer kleinen Auswahl vorgefertigter, standardisierter Politikinstrumente zu bewältigen. Zumal ein allgemeinverbindlich anerkanntes Standardset von Politikinstrumenten, aus dem nur gewählt werden müsste, aus theoretischer Perspektive kaum möglich erscheint [Lindner und Peters 1989; van Nispen tot Pannerden 2011; Le Galès 2011]. Wie Gjalt Huppes bereits vor zwanzig Jahren anmerkte, sind die simplen Lösungen in der Umweltpolitik weitgehend ausgereizt. Die Komplexität der Probleme nimmt zu und um neu auftretenden Umweltproblemen zu begegnen, stehen eher selten geeignete Lösungen standardmäßig zur Verfügung [Huppes 2001]. Auf den Klimaschutz trifft dies unzweifelhaft zu, weil er im Sinne einer gesamtgesellschaftlichen Transformation grundsätzlich in allen Bereichen des gesellschaftlichen Lebens, und über alle Sektoren hinweg, sowohl Anpassungen als auch grundlegende Veränderungen erfordert.

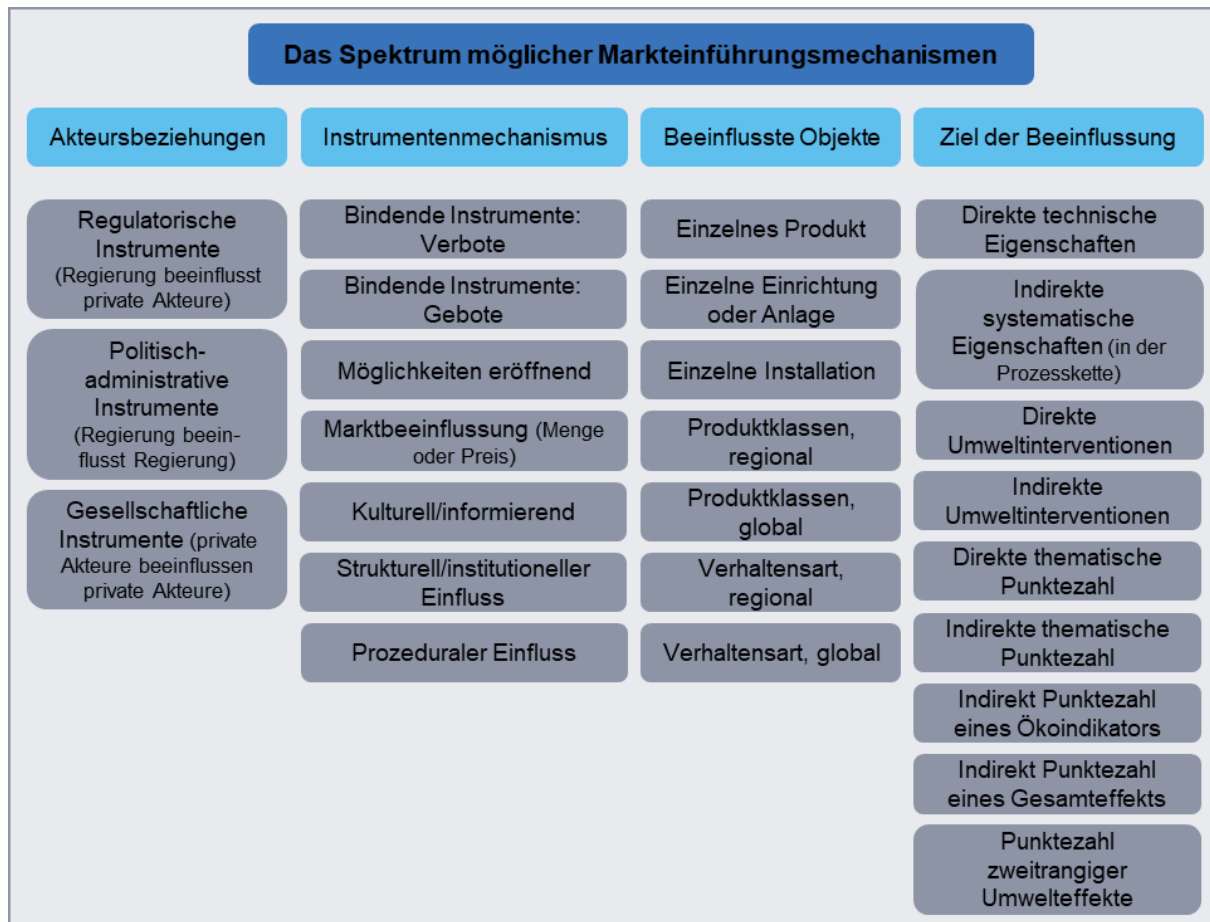
Die Steuerung des Verhaltens zahlreicher Akteure in mannigfaltigen Kontexten sowie das Ausräumen ihrer Beziehungen untereinander, um gesamtgesellschaftlich eine möglichst effektive wie effiziente Ausgestaltung der Transformation zu erreichen, erfordert Maßnahmen, die auf das jeweils konkrete Problem zugeschnitten sind, ohne die übergreifende Zielsetzung aus den Augen zu verlieren. Eingesetzte Markteinführungsmechanismen sollten dabei ziel- wie passgenau ausgestaltet werden. Die Begrenztheit verfügbarer staatlicher Ressourcen, handele es sich nun um finanzielle Förderung, Kontrollmöglichkeiten oder andere Mittel, mit denen die anstehenden Aufgaben zu bewältigen sind, legt es ebenso nahe, auf Instrumente zurückzugreifen, die nur einen solchen Komplexitätsgrad aufweisen und so viele Mittel einsetzen, wie



die jeweilige Zielstellung es erfordert. Zwar wird der Mitteleinsatz nicht in jedem Fall a priori exakt festzulegen sein, doch lässt sich sagen, dass das Vorgehen strukturell darauf ausgelegt sein sollte, Lösungen induktiv, anhand der konkreten Problemstellung, zu entwickeln.

Ob dabei MEM konzipiert werden können, die dem Grundsatz „One size fits all“ entsprechen, also möglichst viele Akteure auf einmal adressieren, oder durch gezieltes Einwirken auf einzelne Akteure bzw. Akteursgruppen die gewünschten gesamtsystemischen Effekte erzielt werden können, wird jeweils anhand des Zwecks eines jeden MEM festzulegen sein. Gleichwohl ist es umso unwahrscheinlicher, die ganze Bandbreite von Akteuren mit einem einzelnen MEM erreichen zu können, je vielfältiger die relevanten Akteure werden. Vielversprechender wird eine Strategie sein, die mehrere MEM zu Bündeln zusammenfasst. Das Zusammenspiel der Akteure kann mittels solcher Maßnahmenbündel beeinflusst werden, in dem sie auf - als zentral definierte - Stellschrauben einwirken. Adressiert werden dabei zuvorderst jene Akteursgruppen, die entscheidend zur Beseitigung hemmender Faktoren des Markthochlaufs sind.

Gerade weil es im Rahmen von TIS sehr stark darauf ankommt, Akteursverhalten in die gewünschten Bahnen zu lenken und die Beziehungen der Akteure untereinander in förderlicher Weise auszugestalten, wird hier ein breites Verständnis von MEM angelegt. Als theoretische Fundierung kategorisiert [Hupperts 2001] mehr als 2.000 verschiedene Instrumente anhand einer Typologie aus drei verschiedenen Akteursbeziehungen, sieben Mechanismen der Beeinflussung, sieben Arten von beeinflussbaren Objekten sowie acht Arten zu erreichender Operationsziele.



**Abbildung 9-3:** das Spektrum möglicher Markteinführungsmechanismen (in Anlehnung an [Huppés 2001, S. 30])

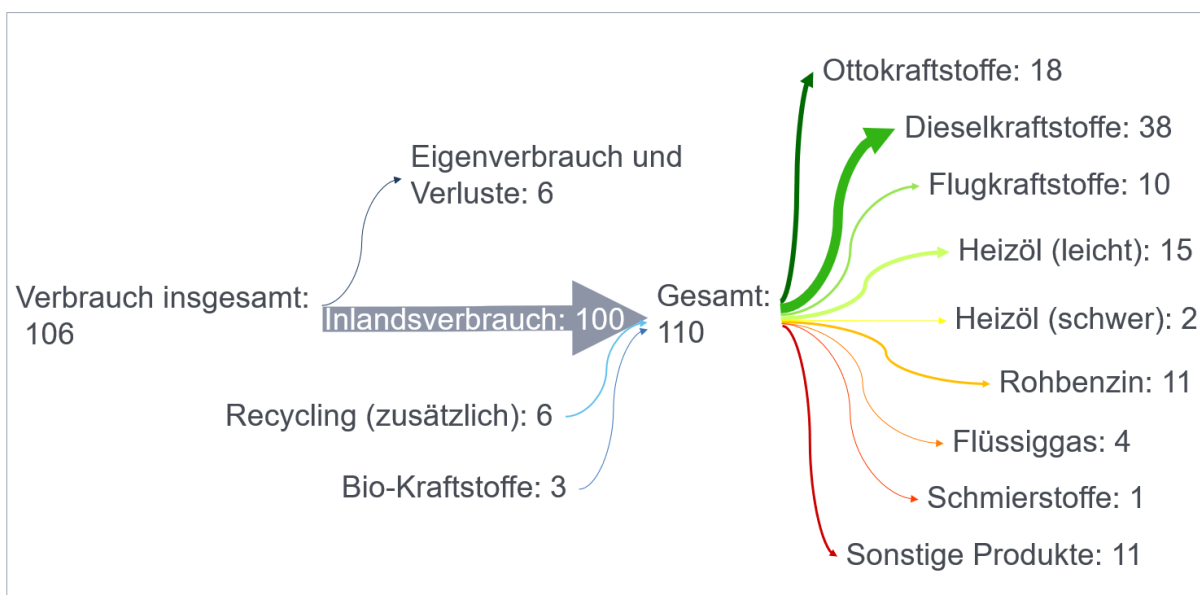
Somit existiert eine enorme Bandbreite von Politikinstrumenten, die gezielt anhand des zu bearbeitenden Problems erschlossen werden können [Huppés 2001]. Auch Le Galès hält fest, dass es sich bei Politikinstrumenten um Institutionen handelt, die erst konstruiert werden müssen, weil sie gerade nicht frei verfügbar bereit stehen [Le Galès 2011]. Daraus, dass sich folglich ein sehr pragmatisch orientiertes Vorgehen beim Zuschnitt von MEM sowohl praktisch anbietet als auch theoretisch begründet, ergibt sich, dass ein politisches Mittel, das der obigen Definition von MEM genügt, unabhängig von seinem Komplexitätsgrad und enger gefassten wissenschaftlichen Typologien von Politikinstrumenten, im Sinne der Aufgabenstellung als MEM Anwendung finden kann.<sup>26</sup> Inwieweit ein politisches Instrument sich als MEM für synthetische Kraftstoffe eignet, kann daher nicht rein theoretisch ermittelt werden, sondern sollte anhand der demokratisch formulierten, gesamtgesellschaftlichen Anforderungen der - und an die - Verkehrswende sowie der zugrundeliegenden, im Rahmen des Projektes BEniVer entwickelten, Bewertungskriterien erfolgen.

<sup>26</sup> Das Bestreben der Politikwissenschaft, eine umfassende Typologisierung von Politikinstrumenten zu entwickeln, zielt insbesondere darauf ab, mittels einer Theorie der Instrumentenwahl einen Ausgangspunkt zur vertiefenden Analyse des Policymakings zu erschließen [Lindner und Peters 1989]. Für die konkrete Problemstellung der Markteinführung von synthetischen Kraftstoffen sind solche Fragen klar zu vernachlässigen.

Im folgenden Kapitel wird das bestehende Umfeld des (weltweiten) technologischen Innovationssystems der (Markteinführung von) synthetischen Kraftstoffen überblicksmäßig daraufhin analysiert, wie diese Märkte strukturiert sind und welche Rolle synthetische Kraftstoffe (bzw. Wasserstoff als ein wesentliches Ausgangsprodukt hierfür) sowie erneuerbare Energien bereits darin spielen bzw. welche TIS-Funktionen bereits erfüllt sind.

## 9.2 Überblick über bestehende Kraftstoffmärkte

Die wesentliche Funktion synthetischer Kraftstoffe besteht darin, das bisher genutzte fossile Erdöl – und in geringeren Mengen auch Erdgas – im Verkehrssektor zu ersetzen. Insbesondere beim Erdöl ist dabei zu beachten, dass dieses auch außerhalb des Energiesektors (mit den Bereichen Strom, Wärme und Verkehr) angewendet wird und in der Zukunft dort ebenfalls ersetzt werden muss. Die gesamte Bandbreite der Nutzung des Erdöls (im energetischen und nicht-energetischen Bereich) und der bislang eher geringen Mengen seiner Substitute in Form von biogenen Kraftstoffen wird in Abbildung 9-4 dargestellt.



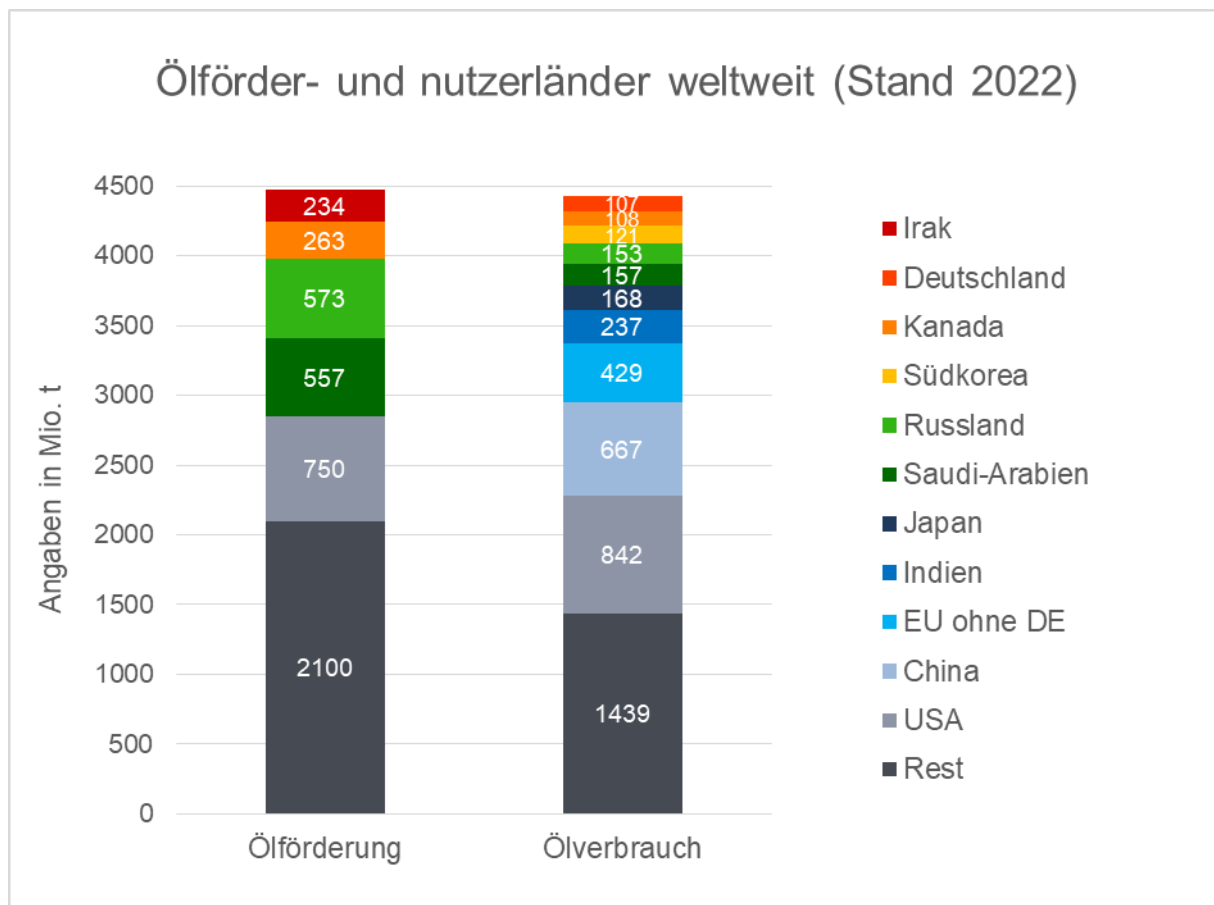
**Abbildung 9-4:** Mineralölverbrauch in Mio. t (es bestehen rundungsbedingte Differenzen) in der Bundesrepublik Deutschland im Jahr 2019 (nach [AGEB 2020])

Damit diese Substitution gelingen kann, ist es wichtig, die wesentlichen Einsatzbereiche, die Herkunft, die genutzten Mengen sowie die grundsätzlichen Markt- und Preisstrukturen beider Energieträger zu kennen. Diese werden daher im Folgenden beschrieben.

### 9.2.1 Nutzungspfade und Mengen bisheriger fossiler Kraftstoffe

Mit Blick auf den Verkehrssektor sind insbesondere die Angebots- und Nachfragestruktur der Ölmärkte – und zu einem gewissen Grad auch die der Gasmärkte – relevant. Hinsichtlich der Hauptproduzenten – und potenziellen Exporteure – zeigt Abbildung 9-5, dass sich gut die Hälfte (53 %) der globalen Ölförderung auf die fünf Länder USA (17 %), Russland (13 %), Saudi Arabien (12 %), Kanada (6 %) und den Irak (5 %) verteilen. Davon sind der Irak und Saudi-Arabien Mitglieder der OPEC.

Die gesamte OPEC hat einen Anteil von 37 % an der Weltölproduktion (bp 2022). Somit ist eine gewisse Konzentration vorhanden, die allerdings relevante Konzentrationsmaße kaum übersteigt (vgl. [Klann 2018] und [Klann 2021], nicht veröffentlicht).



**Abbildung 9-5:** Ölförder- und -nutzerländer weltweit (Stand 2022) (nach [bp 2022; EUROS-TAT 2022b])

Dem gegenüber steht eine Ölverbrauchsstruktur mit den größten Verbrauchern USA (19 %) und China (15 %). Der Anteil der EU ohne Deutschland lag bei knapp 10 %. Abgesehen von Indien liegt der Anteil aller weiteren Verbraucher unter 5 %; der deutsche Anteil beträgt 2 % ([bp 2022], eigene Berechnungen). Für diese Verbräuche besteht allerdings – neben Öl auch für Gas – eine hohe Importabhängigkeit sowohl in Deutschland als auch EU-weit (vgl. Tabelle 9-2). Besonders Öl- und Ölprodukte werden mit über 96 % nahezu ausschließlich importiert. Dabei ist zu bedenken, dass sich eine Diversifizierung der Lieferländer insb. aufgrund des Transports durch Pipelineinfrastrukturen – trotz der anteilig geringen Mengen am weltweiten Handelsvolumen – schwierig gestalten kann. Bei Erdgas ist die Importquote mit knapp zwischen 84 und 90 % etwas niedriger. Insgesamt liegt Deutschland nahe an den Durchschnittswerten des Euro-Raums und leicht über denen der EU 27.

**Tabelle 9-2:** Importabhängigkeit der EU und Deutschlands für ausgewählte Energieträger (Stand 2020) (nach [EUROSTAT 2022a])

	Gesamt	Feste fossile Brennstoffe	Erdgas	Öl und Ölprodukte (ohne Biokraftstoffe)	Erneuerbare und Biokraftstoffe
EU 27	57,5 %	35,8 %	83,6 %	97,0 %	2,5 %
Euro-Raum 15	62,1 %	58,9 %	86,8 %	97,9 %	1,4 %
Deutschland	63,7 %	44,1 %	89,1 %	96,5 %	0,9 %

Mit Blick auf die Ölnutzung zeigen Tabelle 9-3 den Bruttoinlandsverbrauch der EU 27 und Tabelle 9-4 den Primärenergieverbrauch Deutschlands. In beiden Tabellen zeigt sich zunächst die hohe Bedeutung dieser Energieträger im Energiemix. So war im Jahr 2019 (dem letzten „normalen“ Jahr, d. h. vor der COVID-19-Pandemie) Mineralöl sowohl EU-weit als auch national der wichtigste Energieträger, gefolgt von Erdgas, die zusammen über 60 % ausmachten. Der deutsche Anteil von Stein- und Braunkohle liegt mit insgesamt 17,5 % noch überdurchschnittlich hoch. Bei erneuerbaren Energien liegt Deutschland mit insgesamt 14,9 % ungefähr im EU-Durchschnitt (15,9 %).

**Tabelle 9-3:** Bruttoinlandsverbrauch an Energieträgern in der EU 27 (Stand 2019) (nach [EUROSTAT 2022b])

	TWh	%
Feste fossile Brennstoffe inkl. Torf	2.026	11,9
Öl und Ölprodukte inkl. Ölschiefer & -sände	5.875	34,6
Erdgas	3.897	23,0
Nuklear	2.282	13,5
Wasser, Wind, Solar & andere Erneuerbare	1.084	6,4
Biokraftstoffe und EE aus Abfall	1.614	9,5
Elektrizität	3	0,0
Wärme	13	0,1
Abfall, nicht-erneuerbar	164	1,0
Gesamtverbrauch	16.957	100

**Tabelle 9-4:** Primärenergieverbrauch Deutschland nach Energieträgern (Stand 2019) (nach [BMWK 2022a Tabelle 4 (Auszug)])

	TWh	%
Mineralöl	1.253	35,2
Steinkohle	301	8,5
Braunkohle	323	9,1
Erdgas, Erdölgas	893	25,1
Kernenergie	228	6,4
Wasser- und Windkraft	192	5,4
Andere Erneuerbare	337	9,5
Außenhandelsaldo Strom	-33	-0,9
Sonstige	63	1,8
Gesamtverbrauch	3.557	100

Mit Blick auf die Verbrauchsstruktur in den Sektoren zeigen die Tabelle 9-5 und Tabelle 9-6 die hohe Bedeutung von Mineralölprodukten vor allem im Verkehrssektor. Tabelle 9-5 zeigt, dass bei einer Markteinführung von synthetischen Kraftstoffen die Hauptsubstitution im Verkehrssektor liegt. Mit deutlichem Abstand haben Mineralölprodukte eine gewisse Bedeutung in den Sektoren private Haushalte (HH) und Gewerbe, Handel, Dienstleistungen (GHD), in denen Mineralöl überwiegend zum Heizen eingesetzt wird. Die Sektoren priv. HH und Industrie stellen zudem die größten Gasverbraucher. Während Ersterer Gas vor allem zum Heizen verwendet, wird es in Letzterem auch für Prozessenergie und als Grundstoff (z.B. Chemieindustrie, vgl. die Pfade „Rohbenzin“, „Schmierstoffe“ und „sonst. Produkte“ in Abbildung 9-4) eingesetzt. Tabelle 9-6 ermöglicht eine bessere Einordnung anhand der Anteile: Der gezeigte Anteil der Mineralölprodukte von 94 % im Verkehrssektor teilt sich auf 52 %-Punkte Dieselkraftstoff, 26 %-Punkte Benzin und 16 %-Punkte Flugbenzin & Flugturbinenkraftstoff auf. Bei den privaten Haushalten ist der Anteil von Öl und Gas insgesamt kleiner. Hier bildet Erdgas zum Heizen den größten Anteil. Auch bei den Mineralölprodukten handelt es sich nahezu ausschließlich um Heizöl. Bei den übrigen Energieanteilen (nicht in der Tabelle dargestellt) handelt es sich um erneuerbare Energien (14 %) sowie Strom (19 %) und Fernwärme (8 %), wobei die letzten beiden auch gewisse Anteile an Öl und Gas enthalten, die aber in den entsprechenden Umwandlungssektoren „verbucht“ sind. Im Sektor GHD ist vor allem der Anteil an Gas etwas geringer, dafür ist der Stromanteil (nicht in der Tabelle dargestellt) höher (39 %). In der Industrie, schließlich, dominiert der Anteil an Gasen. Hinzukommen (nicht in der Tabelle dargestellt) signifikante Anteile an Strom (31 %) und ein gewisser Anteil Steinkohle (13 %).

**Tabelle 9-5:** Endenergieverbrauch von Öl und Ölprodukten und Gas nach Sektoren (Stand 2019 - in TWh) (nach [BMWK 2022a Tabelle 6a (Auszug)])

	Verkehr	Priv. HH	GHD	Industrie	Gesamt
Mineralöl	712	138	70	24	943
Erd- & Flüssiggas	2	257	106	243	607

**Tabelle 9-6:** Anteile von Öl und Ölprodukten und Gas nach Sektoren am Endenergieverbrauch (Stand 2019 – in %) (nach [BMWK 2022a Tabelle 6a (Auszug)])

	Verkehr	Priv. HH	GHD	Industrie
Mineralölprodukte	94 %	20 %	19 %	3 %
Erd- & Flüssiggas	1 %	38 %	29 %	35 %
Summe*	94 %	59 %	48 %	38 %

\* Differenzen durch Rundungen

### 9.2.2 Preise und Preisstruktur von Erdöl mit Fokus Straßenverkehr

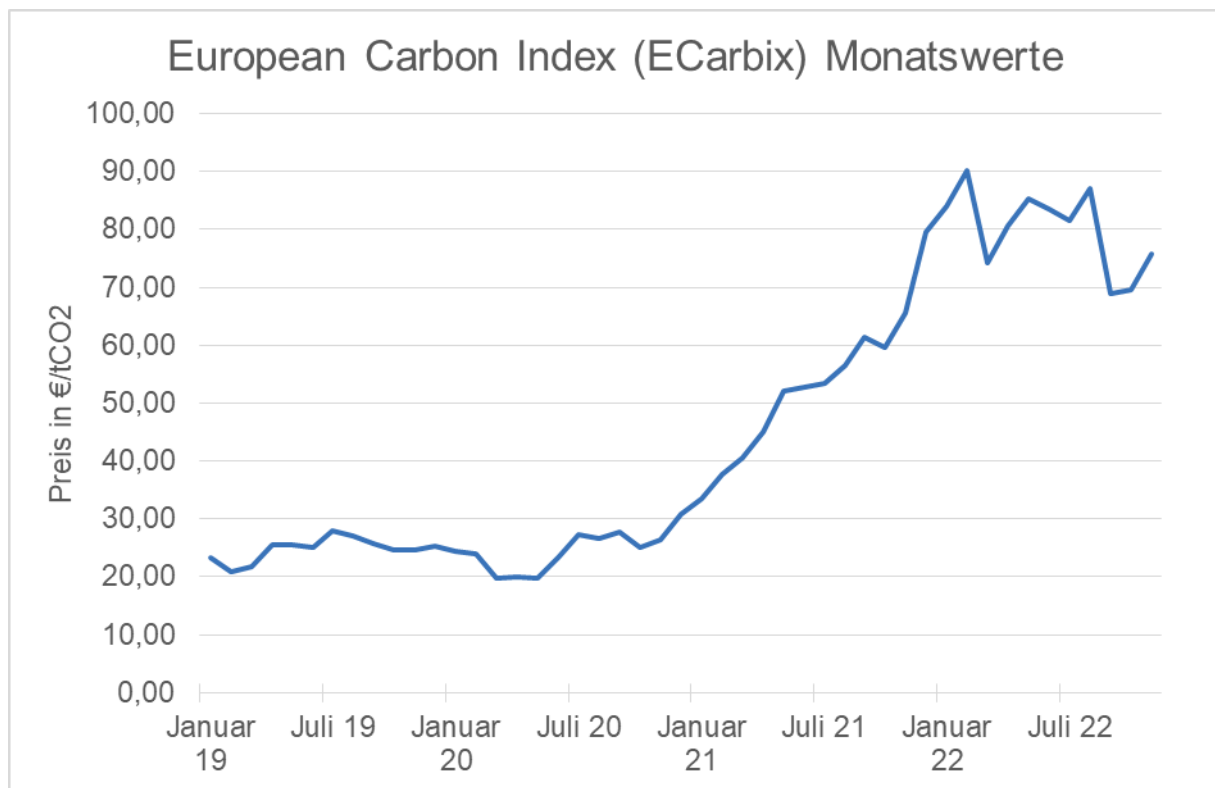
Der Verbrauch von Kraftstoffen unterliegt verschiedenen Abgaben, wobei dies auch je nach Sektor variiert, da z. B. die Luftfahrt bislang von der Besteuerung ausgenommen war. Nach der Einführung der ökologischen Steuerreform wurde 1999 bis 2003 u.a. die Mineralölsteuer<sup>27</sup> in mehreren Stufen erhöht (teils nach CO<sub>2</sub>-Gehalt differenziert). Dieser Aufschlag liegt seit 2003 konstant bei 0,1535 ct/ Liter. Dies entspricht einem CO<sub>2</sub>-Preis von 64,77 €/t<sup>28</sup> für Benzin (E05) und 57,92 €/t<sup>29</sup> für schwefelarmen Diesel. Mit der Einführung des Klimaschutzgesetzes im Jahr 2019 [KSG 2021] wurden erstmals sektorale absolute Emissionsobergrenzen, die einen sinkenden THG-Pfad 2020 bis 2031 vorsehen, festgelegt. Zur instrumentellen Umsetzung wurde 2019 / 2020 mit dem BrennstoffemissionshandelsGesetz [BEHG 2022] ein Emissionshandel für nicht im EU ETS abgedeckte Verbraucher fossiler Brennstoffe – also auch den Verkehr – etabliert. Allerdings ist der Preis der CO<sub>2</sub>-Zertifikate bis einschl. 2026 festgelegt (25 €/t CO<sub>2</sub> ab 2021, 30 €/t CO<sub>2</sub> für 2022 und 2023 [BEHG 2022], dann sukzessive ansteigend auf 55€/t CO<sub>2</sub> in 2025, 2026: Korridor 55-65 €/t CO<sub>2</sub>). D.h. eine freie Auktion, die sich an den tatsächlichen Minderungsanforderungen orientiert und einen entsprechenden Zertifikatspreis anzeigt (und damit, welche technischen Alternativen in den verbleibenden drei Jahren bis zur

<sup>27</sup> Heute wird diese als Energiesteuer bezeichnet. Ihre absolute Höhe ist seit 2003 unverändert (Vgl. [EnergieStG 2022] für den heutigen Stand und [Kalinowska et al. 2005, S. 6]), so dass die übrigen Bestandteile der damaligen Mineralölsteuer den expliziten Zielen der ökologischen Steuerreform zugerechnet werden können. Gemäß d. Art. 1 des Straßenbau-Finanzierungsgesetz [StrFinG 2017] gehen grundsätzlich wesentliche Teile der (ehem.) Mineralölsteuer in den Straßenbau, ausser „...Mehraufkommen an Mineralölsteuer, das sich infolge der Änderung von §§ 2, 8 Abs. 2 und § 15b des Mineralölsteuergesetzes durch Artikel 1 Nr. 2, 8 und 19 des Verbrauchsteueränderungsgesetzes 1988 vom 20. Dezember 1988 (BGBl. I S. 2270) und der Änderung von §§ 2, 8 Abs. 2 und § 15b des Mineralölsteuergesetzes durch Artikel 3 Nr. 1, 2 und 5 des Gesetzes vom 24. Juni 1991 (BGBl. I S. 1318) ergibt“.

<sup>28</sup> Bei einem angenommenen Gehalt von 2,37 Kg CO<sub>2</sub> pro Liter und der vereinfachenden Annahme von 750 g/ Liter Benzin.

<sup>29</sup> Bei einem angenommenen Gehalt von 2,65 Kg CO<sub>2</sub> pro Liter und der vereinfachenden Annahme von 840 g/ Liter Diesel.

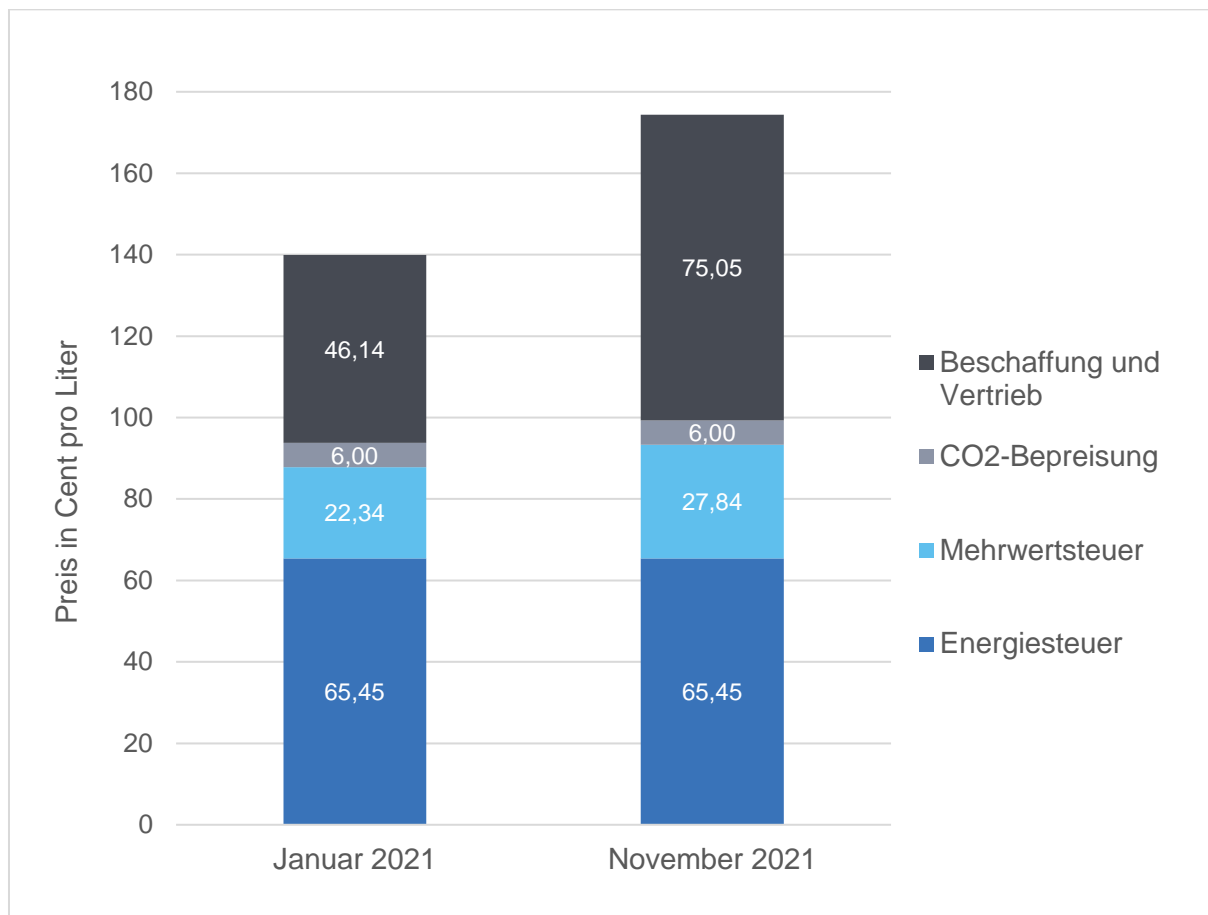
Zielerreichung noch lohnenswert sind), wird sich erst danach einstellen. In der Summe ergeben die beiden Komponenten (Ökosteueranteil und CO<sub>2</sub>-Preis nach BEHG) für das Jahr 2021 einen Preis von rund 90 €/t CO<sub>2</sub> für Benzin und rund 83 €/t für Diesel.



**Abbildung 9-6:** EU-ETS-Zertifikatspreise (nach [EEX 2022])

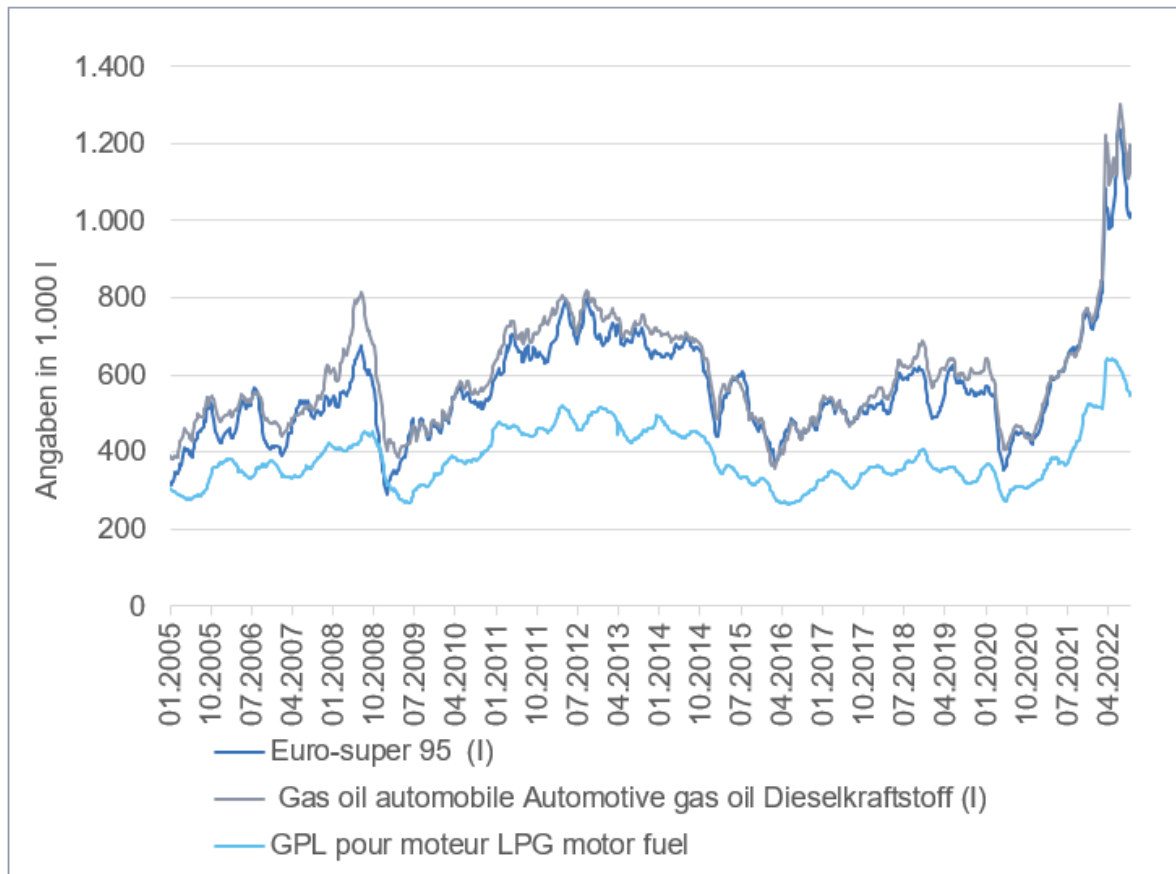
Auch wenn die absolute Höhe des gesamten CO<sub>2</sub>-Preises auf Benzin und Diesel damit aktuell (und mit wenigen Ausnahmen auch historisch seit der Einführung des EU ETS) über den Preisen der EU-ETS-Zertifikate liegt (vgl. Abbildung 9-6), kann hier kaum von einer Abgabe gesprochen werden, die den verursachten Klimakosten entspricht oder eine für die Verbrauchenden planbare Lenkungswirkung zur Erreichung der deutschen Klimaziele leistet. Nach der Methodenkonvention 3.1 des Umweltbundesamtes liegen die Klimakosten der CO<sub>2</sub>-Emissionen für 2020 im Bereich von ca. 200-700 €/t CO<sub>2</sub> Äq [Bünger und Matthey 2020]. Während die ökologische Steuerreform eigentlich genau dazu beitragen sollte, sukzessive die Preise auf fossile Kraftstoffe zu erhöhen, um damit eine Lenkungswirkung im Rahmen normaler Investitionszyklen, d.h. ohne ‚stranded investments‘ zu schaffen, wurde dies nach 2003 nicht mehr weiterverfolgt. Wie oben erläutert, erzielt auch das BEHG nicht unbedingt eine klare Lenkungswirkung für die Verbrauchenden in der Hinsicht, dass es den Ausstoss von (fossilem) CO<sub>2</sub> planbar verteuert und dadurch ebenso planbare Anreize schafft, in alternative bzw. sparsame Fahrzeuge zu investieren.





**Abbildung 9-7:** Preisbestandteile für E5 im Verlauf des Jahres 2021 (nach [Bundeskartellamt 2022, S. 17])

Mit dem russischen Angriffskrieg auf die Ukraine haben sich auch die energiewirtschaftlichen Rahmenbedingungen grundlegend geändert. Wie aus Abbildung 9-8 ersichtlich, ist bspw. europaweit der Konsumentenpreis für Euro-Super 95 ohne Abgaben und Steuern – ausgehend von einem 5-Jahrestief im Mai 2020 – um knapp das 3,5fache gestiegen, wobei der Preisanstieg bereits im Jahr 2021 begonnen hat (vgl. Abbildung 9-7), und dann 2022 massiv beschleunigt wurde. Hier könnte jetzt argumentiert werden, dass das veränderte Marktgefüge derzeit die Funktion einer klimapolitisch motivierten Besteuerung übernimmt. Tatsächlich kann aber auch das aktuell veränderte Marktgeschehen eine politisch gesteuerte konstante Preiserhöhung, die gleichzeitig mit weiteren Maßnahmen zur Unterstützung des Strukturwandels flankiert wird, nicht ersetzen. Die jetzige Situation an den Ölmärkten ist mit einem Ausmaß an Unsicherheiten verbunden, wie es zuletzt in den Ölpreiskrisen Ende der 1970er und der 1980er Jahre präsent war. Die Vorteile eines regulatorisch vorgegebenen, berechenbaren und stetig ansteigenden Preispfads wurden seitdem vielfach diskutiert (exemplarisch hierzu: [Weizsäcker 1989]). Sie fanden eine erste Umsetzung in der o.g. Gesetzgebung zur ökologischen Steuerreform, die allerdings gestoppt wurde. Der ebenfalls o.g. kürzlich eingeführte Emissionshandel des BEHG im Verkehrssektor soll daran anknüpfen. Durch das Aussetzen dieses Konzepts hat die Gesellschaft auf einen 20jährigen Lernprozess verzichtet, Alternativen zum fossil betriebenen Individualverkehr zu entwickeln (seien es synthetische Kraftstoffe, E-Mobilität oder auch die Verkehrsverlagerung), sodass sie nach wie vor stark exponiert ist. Weiterhin würden sich bei einer höheren Besteuerung die derzeitigen Steigerungen der Vorsteuerpreise weniger stark auf die Gesamtpreise auswirken.

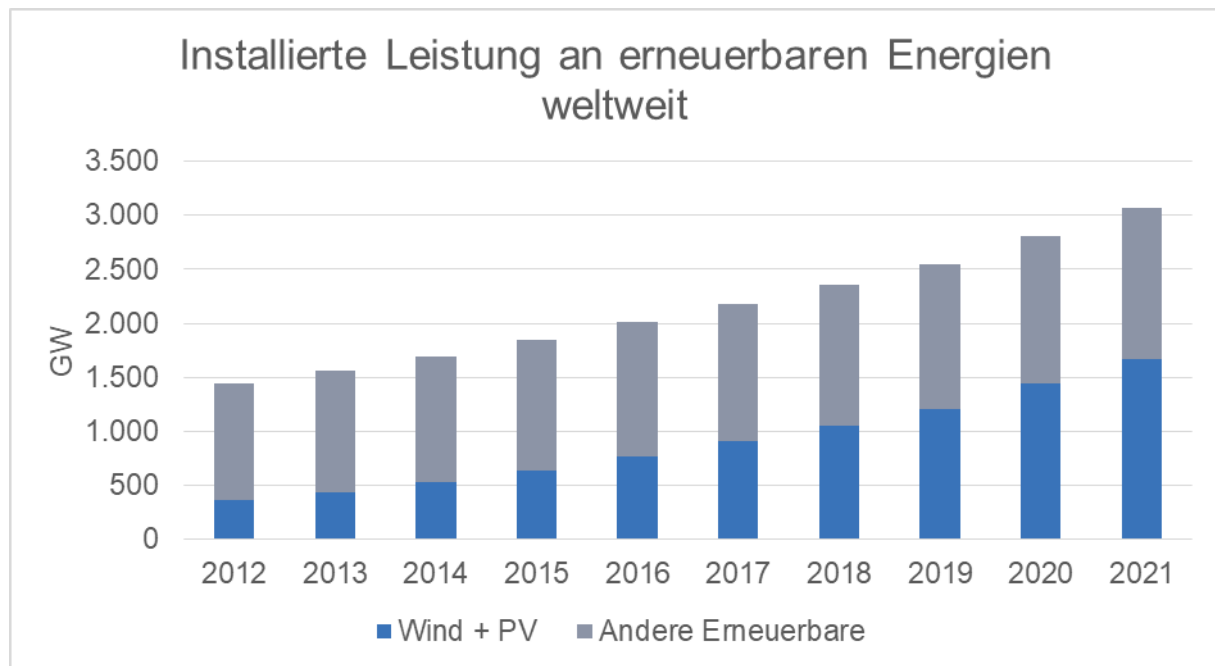


**Abbildung 9-8:** Konsumentenpreise für Ölprodukte ohne Abgaben und Steuern für die EU27 (gewichteter Durchschnitt) (nach [EC 2022b])

Insgesamt zeigt diese Betrachtung der bestehenden Marktstrukturen, dass Mineralölprodukte mit über einem Drittel den größten Posten des Primärenergieverbrauchs ausmachen. Dieser wird in erster Linie im Verkehr als Diesel, Benzin und Flugkraftstoff benötigt, und in zweiter Linie auch in der Grundstoffindustrie. Mit deutlichem Abstand erweist sich demgegenüber Heizöl in den Sektoren private Haushalte und GHD als eine relevante Verbrauchsgruppe. Den zweitgrößten Posten bildet Gas mit einem Viertel des Primärenergieverbrauchs. Dieser wird überwiegend (zu ungefähr ähnlichen Anteilen) in den Sektoren private Haushalte (zum Heizen) und Industrie (Prozesswärme, Grundstoffe) eingesetzt. Im Verkehr spielt Erdgas eine eher unbedeutende Rolle. Folglich besteht in der Substitution des Erdöls im Verkehrssektor mindestens mengenmäßig die größte Herausforderung, auch vor dem Hintergrund der hohen Importabhängigkeit der Bundesrepublik Deutschland und Europas. Dabei ist auch zu beachten, dass die bisherigen Preisstrukturen der fossilen Energieträger im Verkehrssektor nur für eine unzureichende Internalisierung der resultierenden Umwelt- und Gesundheitsschäden ihrer Nutzung gesorgt haben. Unter der Maßgabe, dass synthetische Kraftstoffe in der Lage sind, diese bislang resultierenden Schäden zu vermeiden, ergibt sich hieraus die Anforderung an die Politik (vgl. Abschnitt 9.1), diese implizite Bevorzugung der fossilen Energieträger zu beenden und den Markteintritt von Alternativen zu ermöglichen. Eine weitere Voraussetzung hierfür, der notwendige Ausbau der erneuerbaren Energien und der Herstellungsinfrastruktur für synthetische Kraftstoffe, wird in den folgenden Abschnitten untersucht.

### 9.2.3 Status quo des weltweiten EE-Ausbaus als Voraussetzung für die Herstellung von synthetischen Kraftstoffen

Innerhalb des letzten Jahrzehnts hat sich die installierte Leistung an erneuerbaren Energien ungefähr verdoppelt. Sie ist von ca. 1.500 GW installierter Leistung im Jahr 2012 auf über 3.000 GW installierter Leistung im Jahr 2021 weltweit angestiegen (siehe Abbildung 9-9).

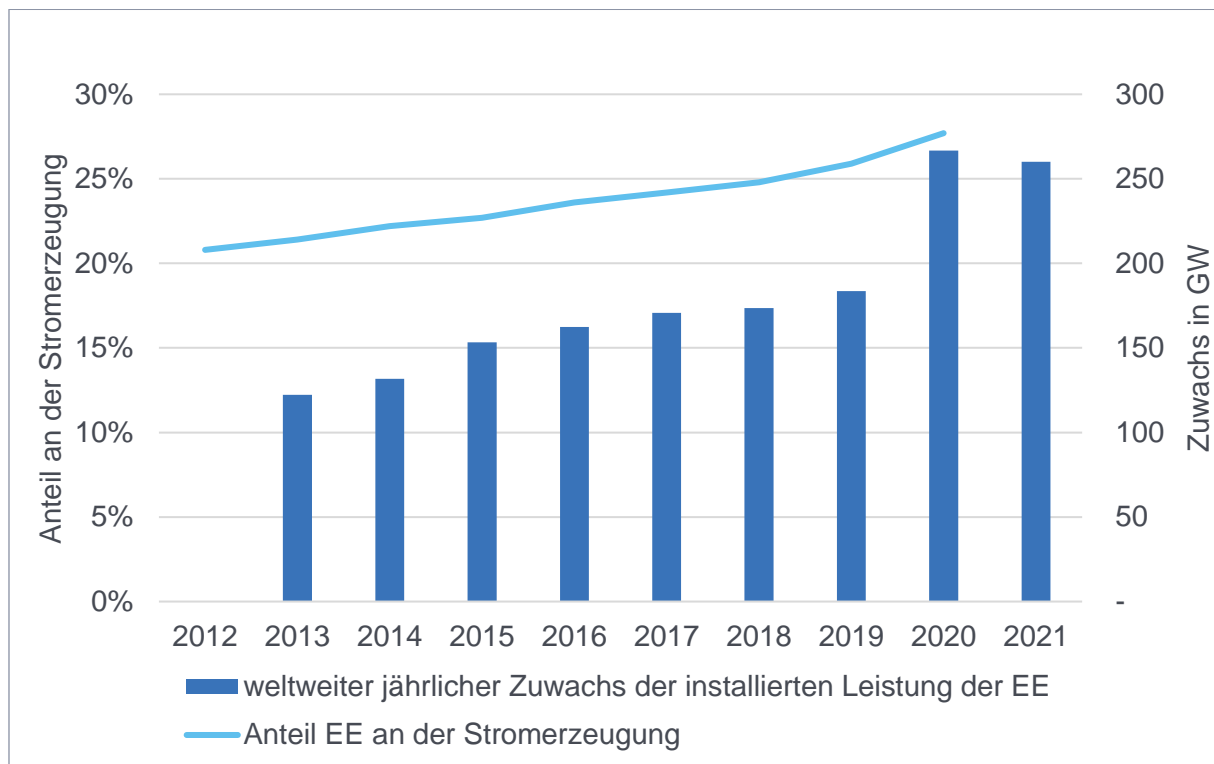


**Abbildung 9-9:** Weltweit installierte Leistung erneuerbarer Energien zur Stromerzeugung und Anteil von Windkraft und Photovoltaik (nach [IRENA 2022b])

Der überwiegende Teil ist durch den Ausbau der Windkraft und der Photovoltaik erreicht worden. Betrachtet man die installierte Leistung dieser beiden Technologien, so hat sich diese nach Zahlen der IRENA<sup>30</sup> innerhalb des letzten Jahrzehnts mehr als vervierfacht.

Auch die Ausbauraten der Erneuerbaren haben sich in den Jahren 2013 bis 2021 verdoppelt und betragen 2021 rund 250 GW pro Jahr im Vergleich zu ungefähr 125 GW im Jahr 2013 (siehe Abbildung 9-10). Dies hatte einen steigenden Anteil der erneuerbaren Energien an der Stromerzeugung zur Folge. Dieser fiel im Vergleich zum Anstieg bei der installierten Leistung allerdings mit ca. 5 % in den Jahren 2012 bis 2020 deutlich geringer aus.

<sup>30</sup> Eigene Berechnungen, vgl. [IRENA 2022b]

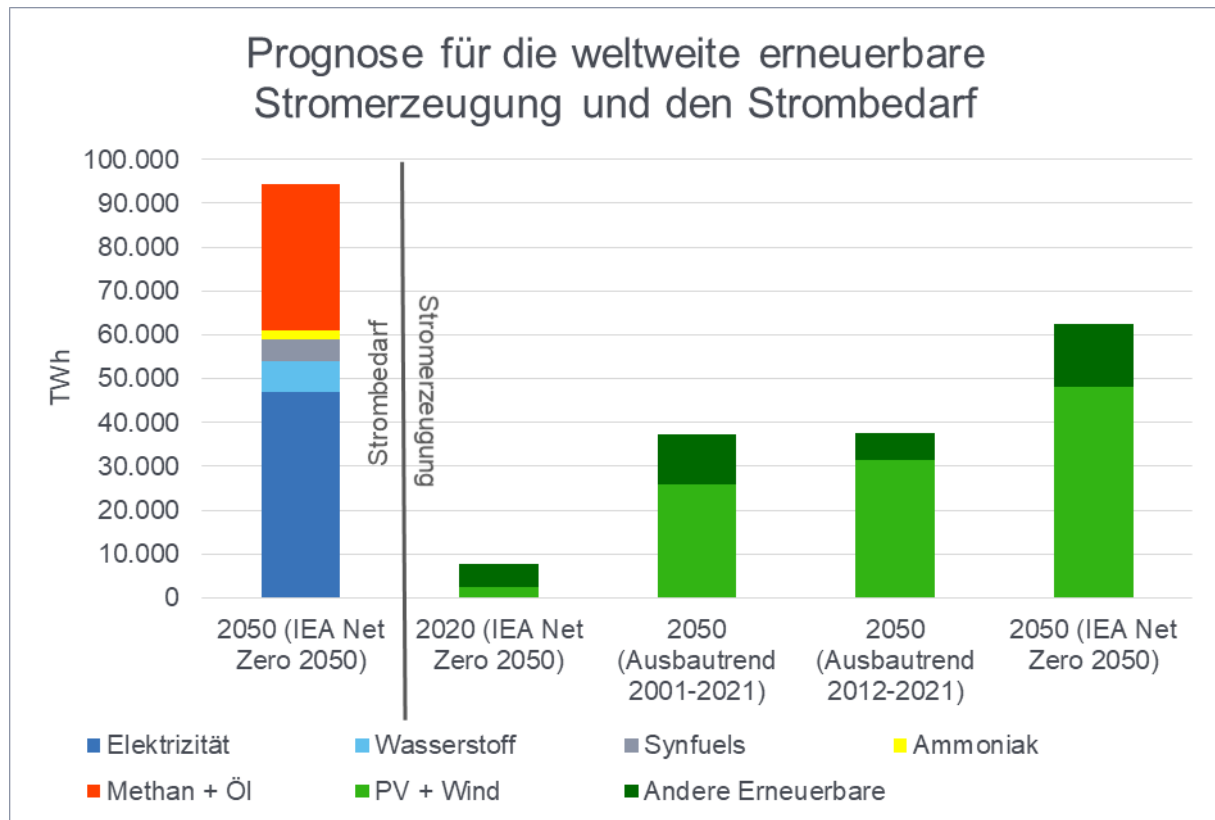


**Abbildung 9-10:** Weltweit jährlicher Zuwachs an erneuerbaren Energien zur Stromerzeugung (nach [IRENA 2022c])

Dieser durchaus beachtliche Ausbau darf jedoch nicht verdecken, dass zur Erreichung einer Versorgung mit 100 % erneuerbaren Energien bis 2050 eine deutliche Beschleunigung des Ausbaus an erneuerbaren Energien notwendig ist. Eine Fortführung der aktuellen Entwicklung in die Zukunft, wie in Abbildung 9-10 gezeigt, macht dies anschaulich. Aktuell liegt die Erzeugung aus erneuerbaren Energien bei weniger als 10.000 TWh pro Jahr. Dabei macht der Anteil von Wind und PV bei der Erzeugung nur einen geringen Teil aus. Der Ausbau dieser beiden Technologien wächst aktuell am schnellsten. Wird der Trend bei den Ausbauraten (Ausbau – Abbau) in die Zukunft fortgeführt, so steigt die aktuelle Ausbaurate bei Wind von 2021 mit 92 GW auf 198 GW (Trend 2001-2021) und 250 GW (Trend 2012-2021). Die Ausbaurate für PV steigt von 138 GW (2021) auf 304 GW (Trend 2001-2021) und 500 GW (Trend 2012-2021).

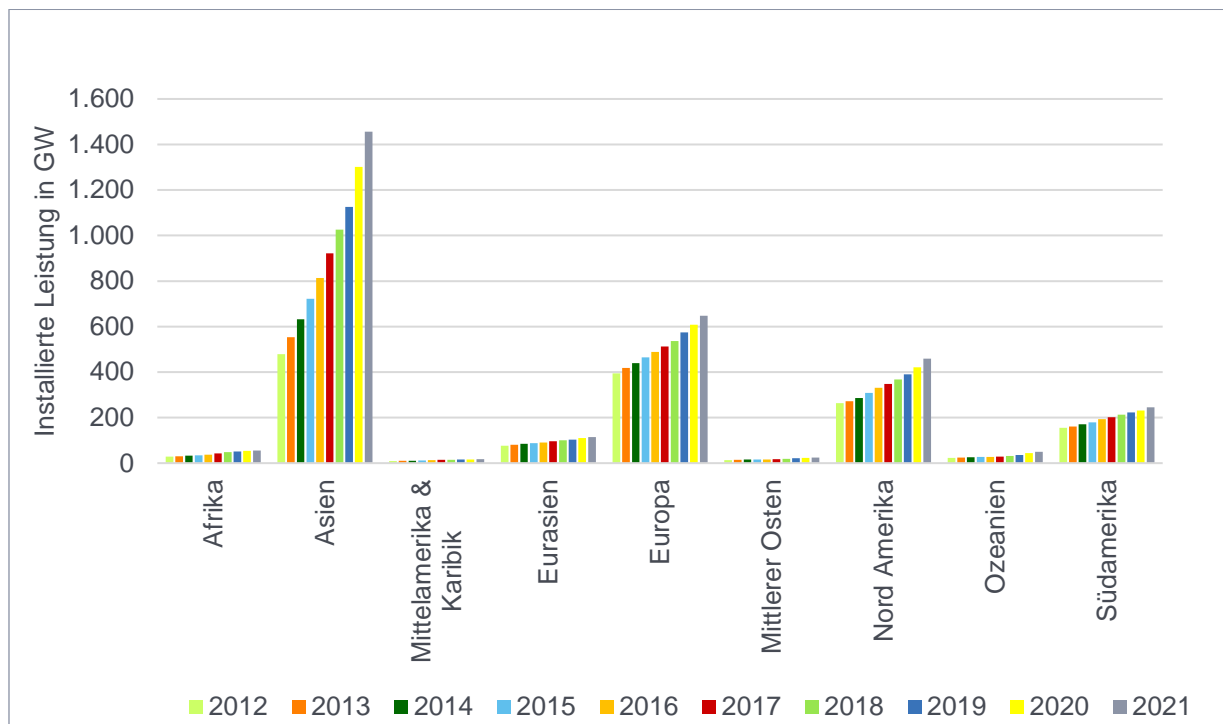
Dennoch bleibt die erzeugte Menge an Strom unterhalb der angenommenen notwendigen Erzeugungsmenge üblicher Szenarien für 2050, z.B. aus dem Net Zero 2050 Szenario der IEA [IEA 2022b]. Bleiben die aktuellen Trends bei den Ausbauraten der Erneuerbaren bestehen, so kann nur ein Teil des im IEA Net Zero 2050 identifizierten Strombedarfs aus erneuerbaren Energien gedeckt werden und es würde keine weitere Energie zur Synthese von grünem Wasserstoff und grünen synthetischen Energieträgern erzeugt werden können. Zur Deckung des Bedarfs ist somit nicht nur eine Steigerung des Ausbaus der erneuerbaren Energien notwendig, sondern es ist auch notwendig, dass die aktuelle Erhöhung der Ausbaurate der erneuerbaren Energien weiter gesteigert werden muss. Dies ist in Abbildung 9-11 ersichtlich, in der der von der IEA angenommene Gesamtstrombedarf im Jahr 2050 der Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien gegenübergestellt wird. Dabei zeigt sich, dass die bisherigen Ausbauraten und die damit produzierbaren Mengen an Wind- und PV-Strom bislang nicht ausreichen

werden, um den gesamten Strombedarf zu decken. Dies ist auch der Fall, wenn die Erzeugung über alle erneuerbaren Energien betrachtet wird; sowohl eine Fortführung des Trends in den Ausbauraten der letzten 20 Jahre, als auch der letzten 10 Jahre führt, basierend auf Daten der Irena für 2050, insgesamt zu ähnlichen Mengen an erneuerbaren Energien.



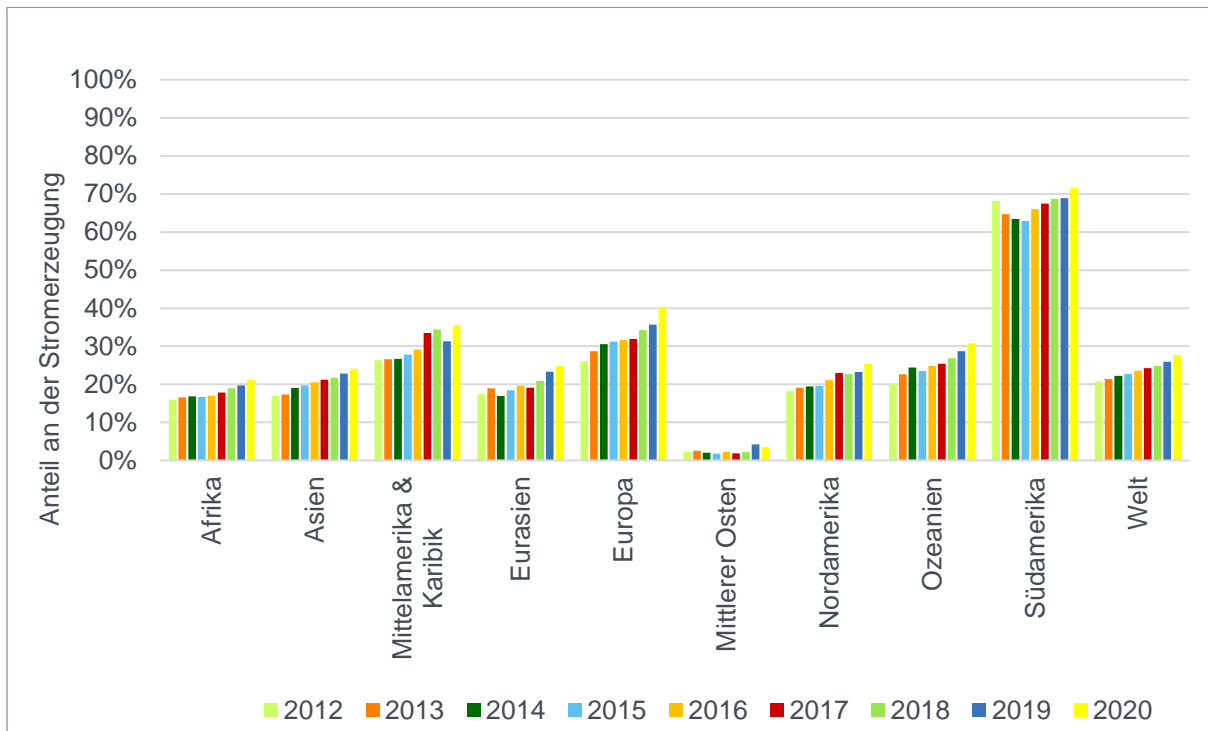
**Abbildung 9-11:** Strombedarf für Elektrizität und Kraftstoffe aus erneuerbaren Energien (nach [IEA 2022b; IRENA 2022b])

Der weltweite Anstieg bei den installierten Leistungen der erneuerbaren Energien findet vor allem in Asien statt (siehe Abbildung 9-12), wo es eine Verdopplung der installierten Leistung von 2012 bis 2021 gab. Die Wachstumsraten in Europa, Nord- und Südamerika sind deutlich geringer. Bezogen auf die absoluten Zahlen spielt Afrika trotz des großen erneuerbaren Potenzials eine geringe Rolle.

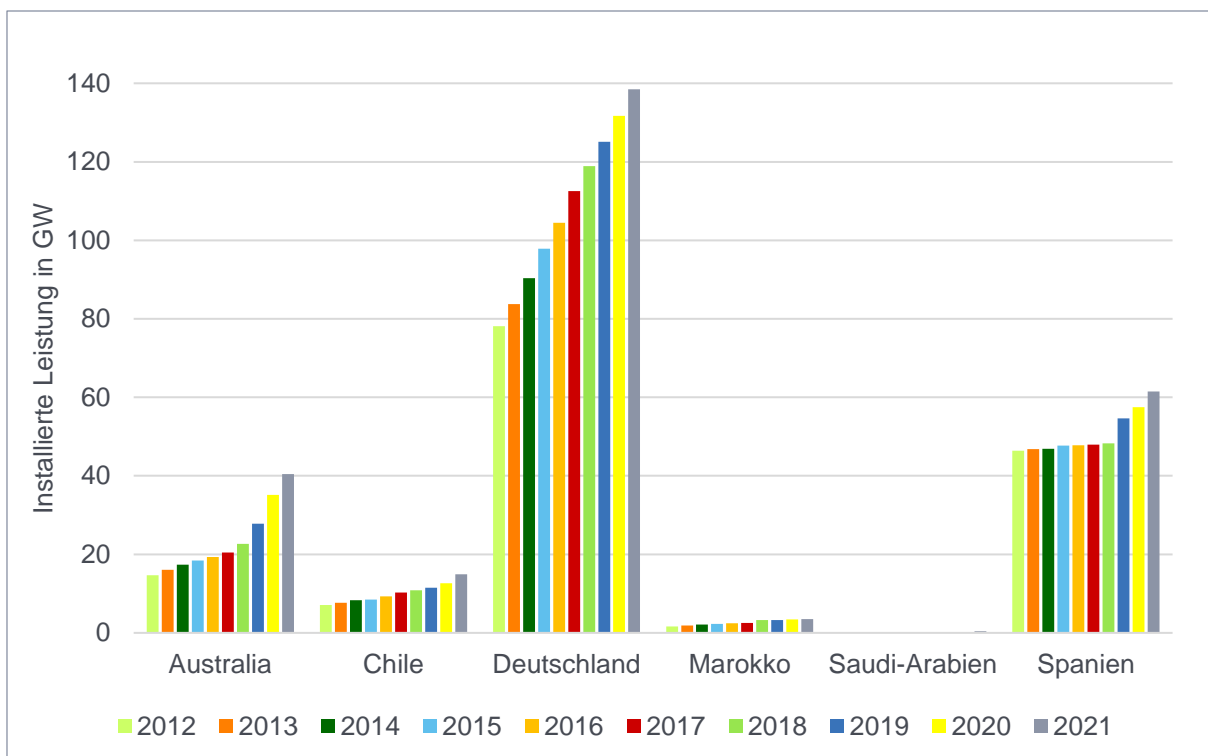


**Abbildung 9-12:** Installierte EE-Leistung zur Stromerzeugung nach Kontinenten (nach [IRENA 2022b])

Südamerika hat (siehe Abbildung 9-13) trotz der geringeren absoluten installierten Leistung mit ca. 70 % im Vergleich den höchsten Anteil an erneuerbaren Energien. Dieser lag 2020 deutlich höher als in Europa mit 40 % und in Nordamerika sowie Asien mit ca. 25 %. In Südamerika fehlt dennoch häufig die Dynamik beim weiteren Ausbau. Während in anderen Regionen eine Steigerung zu verzeichnen ist, blieb der Anteil der Erneuerbaren in Südamerika weitgehend konstant. In Afrika sind die Anteile an erneuerbaren Energien mit 20 % nur leicht geringer als in Asien, wogegen es bei der installierten Leistung klare Unterschiede gibt. Afrika weist gegenüber Asien einen deutlich geringeren Stromverbrauch auf (der sich teilweise mit geringeren Elektrifizierungsraten und auch mit Unterdeckungen des Bedarfs erklären lässt) [UN 2022c, 40f.; World Bank 2022]. Ein Ausbau von erneuerbaren Energien in Afrika oder Südamerika mit dem Ziel, die weltweite Nachfrage nach Wasserstoff u. a. zur Erzeugung synthetischer Kraftstoffe für Europa, Asien und Nordamerika zu bedienen, würde vor diesem Hintergrund eine große Herausforderung bedeuten, insb. wenn es gilt, zuerst die Menschen vor Ort im angemessenen Maß mit Strom zu versorgen. Der Ausbau der erneuerbaren Energien in diesen beiden Regionen, vor allem in Afrika, müsste zuerst die lokalen Bedarfe gewährleisten und erst dann den Export bedienen.

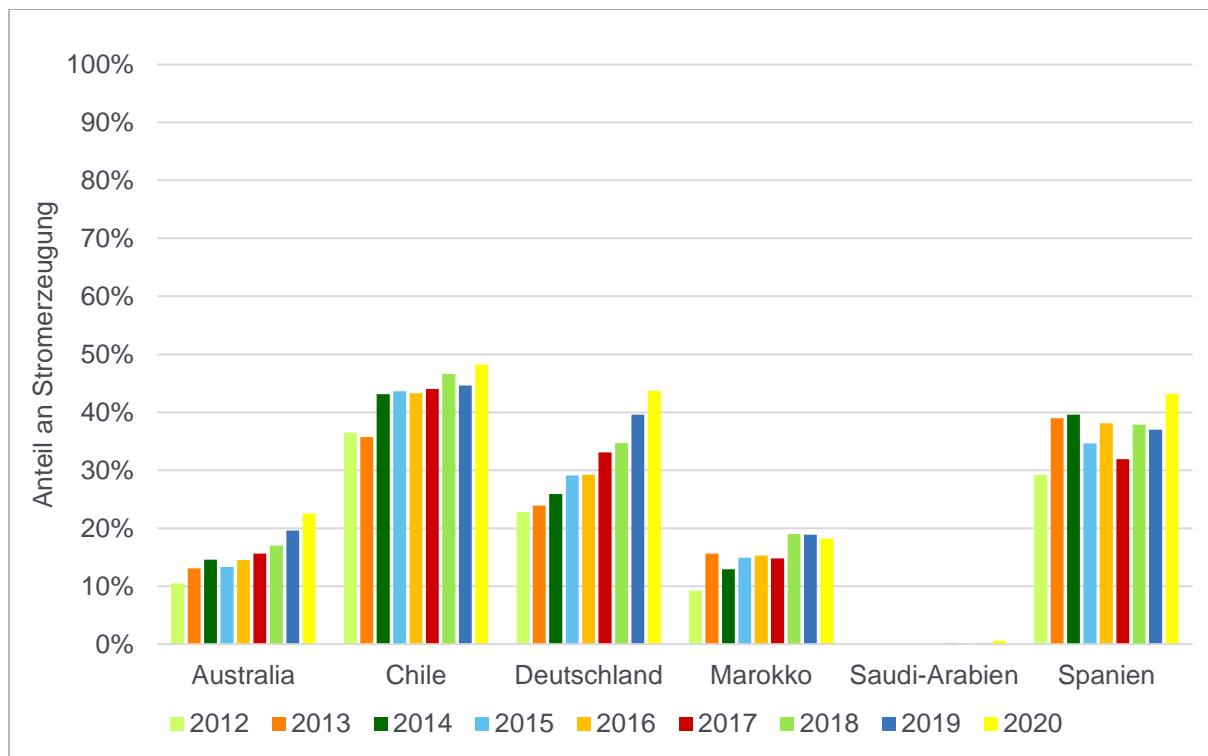


**Abbildung 9-13:** Anteil der EE an der Stromerzeugung nach Kontinenten (nach [IRENA 2022b])



**Abbildung 9-14:** Installierte EE-Leistung zur Stromerzeugung für ausgewählte Länder (nach [IRENA 2022b])

Auch eine Betrachtung spezifischer Länder illustriert, wie groß die Herausforderung sein wird, einerseits die Staaten weltweit mit Strom aus erneuerbaren Energien zu versorgen und andererseits noch zusätzlich Strom zur Erzeugung von synthetischen Kraftstoffen zu gewinnen.



**Abbildung 9-15:** Anteil der EE an der Stromerzeugung für ausgewählte Länder (nach [IRENA 2022b])

#### **9.2.4 Status quo der weltweiten Zielstellungen und Umsetzungen zur Herstellung grünen Wasserstoffs und synthetischer Kraftstoffe**

Ein globaler Markt für Wasserstoff – der, wie erwähnt, stellvertretend für noch völlig abwesende synthetische Kraftstoffe betrachtet wird – ist aktuell nur in einem sehr geringen Ausmaß erkennbar. Die momentane Entwicklung ist durch viele Ankündigungen und wenige Pilotvorhaben geprägt. Zudem gibt es eine (stetig) wachsende Anzahl von Ländern, die eine Wasserstoffstrategie veröffentlicht haben.

Die Bundesregierung hat in ihrer Wasserstoffstrategie von 2020 bis 2030 einen Wasserstoffbedarf von ca. 90 bis 110 TWh pro Jahr identifiziert. Ein Teil dieses Bedarfs soll durch den Bau von Erzeugungsanlagen von bis zu 5 GW Gesamtleistung, einschließlich der dafür erforderlichen Offshore- und Onshore-Energiegewinnung, bis zum Jahr 2030 gedeckt werden. Dies entspräche einer grünen Wasserstoffproduktion von bis zu 14 TWh und einer benötigten erneuerbaren Strommenge von bis zu 20 TWh. Für den Zeitraum bis 2035, spätestens aber bis 2040, sollen nach Möglichkeit weitere 5 GW zugebaut werden [Bundesregierung 2020, S. 5].

Die EU plant im Rahmen der RePowerEU-Initiative, die Hälfte des grünen Wasserstoffs (bis 2030) zu importieren, d. h. ein Importziel von 10 Megatonnen (Mt) pro Jahr [EC 2022a]. Auch



Deutschland ist dabei, Wasserstoffpartnerschaften mit möglichen Exportländern einzugehen. Im Fokus stehen dabei Regionen mit hohen Potenzialen und absehbar niedrigen eigenen Bedarfen.

Konkrete PtL-Ziele können, im Vergleich zu der aktuell wachsenden Anzahl von Staaten mit Wasserstoffstrategien, eher als Ausnahme gelten: Die vorherige Bundesregierung hat in ihrer PtL-Roadmap vom April 2021 [Bundesregierung 2021b] – bekräftigt im Koalitionsvertrag der aktuellen Regierung [Koalitionsvertrag 2021]<sup>31</sup> – eine PtL-Quote<sup>32</sup> angekündigt, die umgesetzt werden soll, indem für die Branche eine verpflichtende Abnahme der bis zum Jahr 2030 geplanten Produktion von mindestens 200.000 Tonnen PtL-Kraftstoffen gelten soll. Auch auf europäischer Ebene wird – als Teil des sog. „Fit-for 55-Pakets“ – an der Umsetzung einer PtL-Quote gearbeitet. Ein verpflichtender Mindestanteil an sog. Sustainable Aviation Fuels (SAF) soll eingeführt werden. Dabei sollen bis 2030 nun mindestens 6% des genutzten Flugkraftstoffs aus SAF bestehen<sup>33</sup>, worunter diverse Kraftstoffstoffe biogenen Ursprungs und synthetische Kraftstoffe auf der Basis von EE-Strom gefasst werden. Die genaue Ausarbeitung der Gesetzestexte – sowohl in der Bundesrepublik als auch auf EU-Ebene – steht zum heutigen Zeitpunkt noch aus.

Der Status quo, bezogen auf die genannten Zielsetzungen und die angekündigten Projekte in diesen Ländern, die von Südamerika über Afrika bis nach Eurasien reichen, ist allerdings bisher nicht ausreichend, um die Importziele der EU zu erfüllen. Sowohl die Ziele, wie auch die angekündigten Projekte erreichen ungefähr die Hälfte der Importziele der EU. Dabei muss zudem bedacht werden, dass auch die Bedarfe in diesen Ländern gedeckt werden müssen. Die EU als Nachfragende ist zudem in einer Konkurrenzsituation mit anderen Ländern in der Welt. Nach dem Net-Zero-2050-Szenario der IEA liegt der weltweite Bedarf für Wasserstoff, der durch Elektrolyse hergestellt wird, bei 80 Mt pro Jahr [IEA 2022a].

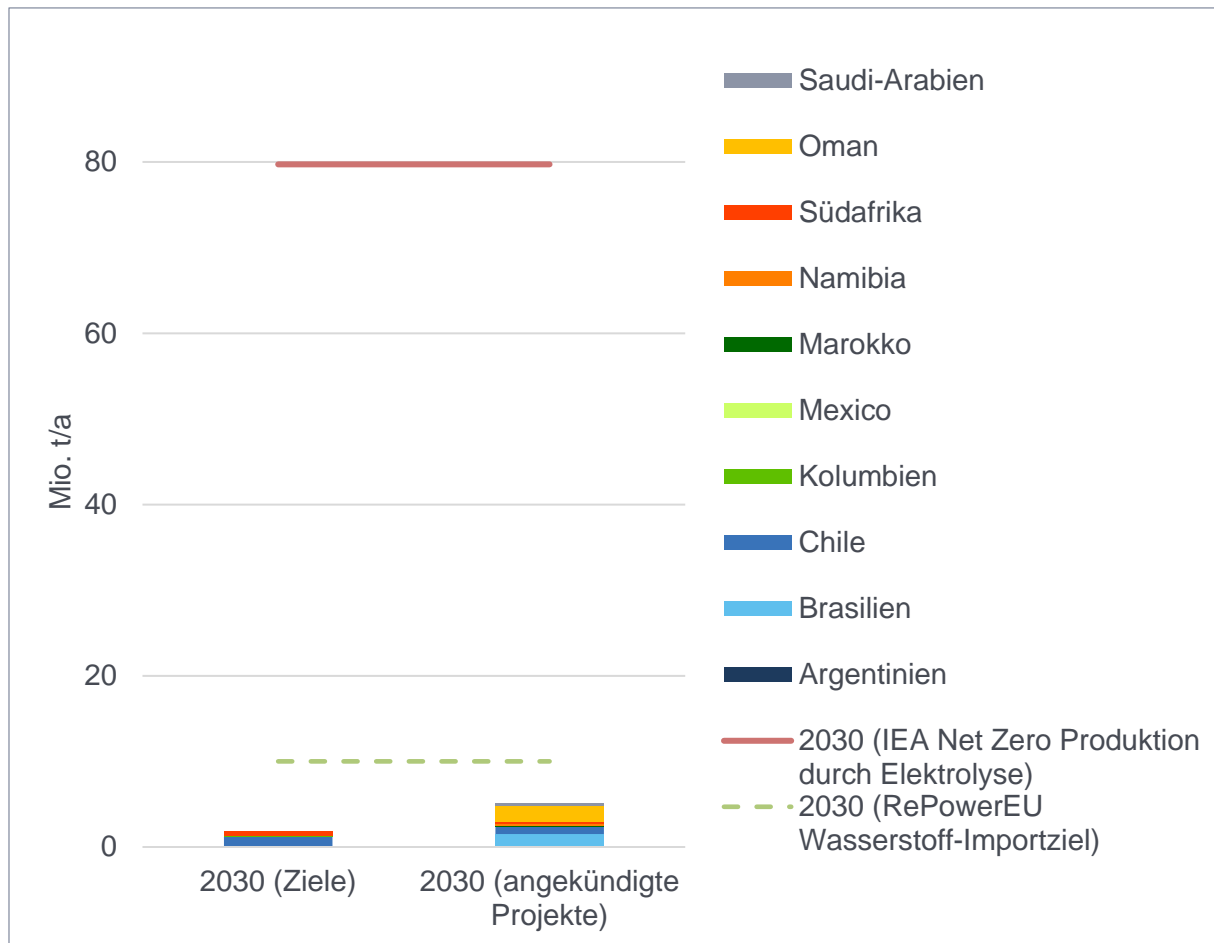
Bei den Wasserstoffzielen sind Chile und Südafrika führend. Während Chile angekündigt hat, einen Teil des Wasserstoffs exportieren zu wollen [Ministries of Energy and Mining Chile 2021], steht in Südafrika vor ambitionierten Exportplänen die Dekarbonisierung der eigenen Wirtschaft im Vordergrund [Department Science and Innovation 2021]. Die insgesamt größte summierte Menge an Wasserstoff pro Jahr aus angekündigten Projekten können Oman, Brasilien und Chile bis 2030 vorweisen. Im Falle von Oman ragt hier vor allem ein Projekt in Al-Wusta heraus, welches 2025/2026 die Produktion starten soll und 1,8 Mt grünen Wasserstoff pro Jahr erzeugen soll [Raj 2022]. Dabei sollen 25 GW PV und Windkraftwerke installiert werden [Mirza 2021]. Die finale Investitionsentscheidung soll aber erst 2025 getroffen werden, weshalb eine gewisse Unsicherheit diesbezüglich bleibt [Raj 2022]. Im Norden von Brasilien gibt es ein großes Wasserstoffprojekt am Port Of Pecem mit einer geplanten Produktion von 1,3 Mt pro Jahr

<sup>31</sup> „ambitionierte Quoten für Power-to-Liquid (PtL-Quoten) im Luft- und Schiffsverkehr“ [Koalitionsvertrag 2021, S. 42]

<sup>32</sup> „eine Verpflichtung der Luftverkehrsunternehmen zur Abnahme relevanter Mengen an PtL-Kerosin in den nächsten Jahren“ [Bundesregierung 2021b, S. 6], wobei die Unterzeichnenden dieser Roadmap (Politik und relevante Verbände) daran arbeiten, „die Produktion von nachhaltig erzeugtem PtL-Kerosin in den nächsten Jahren auf- und auszubauen. Sie halten es für realistisch, dass bis zum Jahr 2030 mindestens 200.000 Tonnen PtL-Kerosin im deutschen Luftverkehr genutzt werden können, das entspricht 2 % des Kerosinabsatzes in Deutschland im Jahr 2019.“ [Bundesregierung 2021b, S. 5]

<sup>33</sup> “The obligation for aviation fuel suppliers to ensure that all fuel made available to aircraft operators at EU airports contains a minimum share of SAF from 2025 and, from 2030, a minimum share of synthetic fuels, with both shares increasing progressively until 2050 (blending mandate and sub-mandate). The general approach also foresees an increase in the minimum share for 2030 from 5 to 6%.” [European Council 2022]

bis 2030. Für den Wasserstoff-Knotenpunkt am Hafen haben aktuell 22 Firmen Absichtserklärungen abgegeben [Hydrogen Central 2022]. In Chile sind es sehr viele einzelne kleinere Projekte, unter denen folgende die größten Produktionsmengen aufweisen sollen: Dazu gehört ein Projekt in der Region Magellanes mit einer geplanten Produktion von 1 Mt Ammoniak und 0,18 Mt Wasserstoff pro Jahr, die in den Export gehen sollen. Außerdem ist in der Region Antofagasta mit 0,7 Mt an grünem Ammoniak pro Jahr, welcher in Teilen für den Export gedacht ist, ein weiteres Projekt geplant. Für das Projekt in der Region Magellanes wurde eine Absichtserklärung unterschrieben und für das Projekt in der Region Antofagasta wird eine Machbarkeitsstudie durchgeführt [Ministries of Energy and Mining Chile 2021, S. 29–33].



**Abbildung 9-16:** Vergleich Wasserstoffproduktionsziele und angekündigter Wasserstoff- und Ammoniakprojekte mit IEA-Net-Zero-Menge und dem Importziel der EU (eigene Berechnungen nach [Ministries of Energy and Mining Chile 2021; Ministerio de Minas y Energia 2021, S. 26; Misculin und Geist 2021; Hydrogen Central 2022; Tarafert 2021; Lancaster 2021; FuelCellsWorks 2021a; Atchison 2022; Chaudier 2021; Sharpe 2021; Mirza 2021; Brown 2020; IEA 2022b; EC 2022a; Department of Science and Innovation 2021, S. 40])

In der Summe zeigt sich, dass für die größeren Wasserstoffprojekte oft v. a. Absichtserklärungen gemacht worden sind. Hingegen bleibt abzuwarten, ob diese wirklich umgesetzt werden.

Zusätzlich sei hier das Beispiel der USA erwähnt, die mit dem „Inflation Reduction Act“ vom August 2022 versuchen, die Produktion von nicht-fossilem Wasserstoff mittels gestufter Steuererleichterungen pro produziertem Kilogramm Wasserstoff zu fördern, sofern dieser diverse (je nach ökologischer Qualität differenzierte) Standards erfüllt. Dieses Gesetz ist nicht unumstritten, da es zwar durchaus geeignet sein könnte, die Produktion von Wasserstoff auf Elektrolysebasis voranzubringen, allerdings auch als zu unspezifisch gilt, was die Verwendung des Wasserstoffes angeht und auch auf Basis von Kernenergie produzierten Wasserstoff zulassen würde, was zu ökologisch langfristig nicht sinnvollen *stranded investments* führen könnte [Krupnick und Bergmann 2022; Esposito und Tallackson 2022; Clifford 2022]. Kritisiert wird zusätzlich die starke Förderung der Kohlenstoffsequestrierung (anstelle der Nutzung), die kontra-produktive Effekte zeigen könnte. Weiterhin wird vor allem die Produktion von Wasserstoff selbst gefördert, nicht aber der Aufbau notwendiger Verteilungsinfrastrukturen. Grundsätzlich erscheint die mengenbasierte Förderung jedoch als zielführendes Instrument. Ein umfassendes Monitoring der Wirkungen dieses Gesetzes ist daher ratsam.

### 9.2.5 Zwischenfazit

Während für die fossilen Energieträger im Verkehrssektor und darüber hinaus etablierte Märkte bestehen, in denen eine implizite preisliche Bevorzugung durch die bislang unzureichende Einpreisung ihrer Schadwirkungen besteht, sind die Voraussetzungen zur Umsetzung der Produktion synthetischer Kraftstoffe bislang alles andere als gesichert.

Eine Bestandsaufnahme angekündigter Wasserstoffprojekte bis zur Mitte des Jahres 2022 hat gezeigt, dass deren Zahl einstweilen überschaubar bleibt. Lediglich vier Projekte waren bereits umgesetzt, dreizehn weitere sollen bis einschließlich 2024 folgen. Fünfzehn Projekte werden laut Planung erst zu einem späteren Datum fertig gestellt sein, während für siebzehn Projekte keine fixe Zeitplanung vorlag. Gemäß der TIS-Typologie (vgl. Abschnitt 9.1.2) befindet sich der Markt für synthetische Kraftstoffe tendenziell noch im Übergang von der Vorentwicklungsphase (pre-development phase) zur Entwicklungsphase (development phase). In der Pre-development phase ist knowledge development entscheidend, in der darauf folgenden development phase das entrepreneurial experimentation [Hekkert et al. 2011, S. 11].

In Bezug auf die für diese Projekte angekündigten Produktionsmengen, könnten dabei in der Summe etwa sieben Mio. t grüner Wasserstoff sowie 28 Mio. t Ammoniak pro Jahr zustande kommen. Wird dem gegenübergestellt, dass alleine die EU bis 2030 ein jährliches Importziel von 10 Mio. t grünem Wasserstoff veranschlagt, zeigt sich, dass bisher bereits bis 2030 eine große Diskrepanz zwischen geplantem Angebot und geplanter Nachfrage weltweit besteht. Auch wenn gegenwärtig immer wieder neue Projekte angekündigt werden, wird es eine große Herausforderung bleiben, sicherzustellen, dass die benötigten Mengen auf dem Weltmarkt tatsächlich verfügbar sein werden.

Im folgenden Abschnitt wird daher eine Ländertypologie erarbeitet, die dazu dienen soll, angepasste Strategien zum Ausbau der erneuerbaren Energien und der Erzeugungskapazitäten in unterschiedlichen Ländern erarbeiten zu können.

### 9.3 Entwicklung einer Ländertypologie als Basis importbezogener Markteinführungsmechanismen

Nach derzeitigem Kenntnisstand ist kaum davon auszugehen, dass die im Abschnitt 6.8 als Modellierungsergebnisse skizzierten Bedarfe allein durch den Aufbau von Produktionskapazitäten innerhalb der Bundesrepublik Deutschland gedeckt werden können. Angenommen wird daher die Bereitstellung der notwendigen Mengen durch eine Kombination inländischer Produktion mit Importen aus dem Ausland. Im Hinblick auf die Markteinführungsmechanismen ergibt sich in der Folge die Notwendigkeit, sowohl Maßnahmen zur Beschleunigung des Markthochlaufs innerhalb der Bundesrepublik als auch zielführende Mechanismen für den Handel synthetischer Kraftstoffe mit anderen Staaten zu entwickeln. Die Markteinführungsmechanismen unterliegen in beiden Fällen den gleichen Prämissen, welche sich als Anforderungen aus den Nachhaltigkeitskriterien (vgl. Abschnitt 3.7 und Abbildung 9-1) an sie ergeben. Da prinzipiell eine große Anzahl an Ländern weltweit für den Import von synthetischen Kraftstoffen in Frage kommen könnte, stellt sich ein sehr heterogenes Feld potenzieller Handelspartner dar. Angesichts dessen gilt es hier, die Robustheit der zu entwickelnden Maßnahmen sicherzustellen. Um also eine erhöhte Unabhängigkeit von (nicht vorhersehbaren) politischen Entwicklungen zu gewährleisten und die Komplexität der Erarbeitung passender Markteinführungsmechanismen zu begrenzen, wird auf möglichst breit anwendbare Instrumente gesetzt. Daher sollen keine Markteinführungsmechanismen für einzelne Länder entwickelt werden, sondern für Ländergruppen.

#### 9.3.1 Erarbeitung einer empirischen Basis zur Ableitung von Ländergruppen

Um mögliche Gruppierungen ableiten zu können, wurden im Rahmen von BEniVer 24 Länder in den Jahren 2020 und 2021 eingehend<sup>34</sup> analysiert. Die untersuchten Länder decken alle Kontinente ab, mit einem deutlichen Schwerpunkt auf potenziellen Importländern in Afrika und Asien sowie Lateinamerika. Tabelle 9-7 zeigt die vollständige Liste.

**Tabelle 9-7:** Liste der analysierten Länder, nach Kontinenten sortiert

Afrika	Asien	Europa	Nordamerika	Südamerika	Australien/Ozeanien
Angola	China	BRD	USA	Argentinien	Australien
Botswana	Indien	Ukraine		Chile	
Kongo	Iran			Mexiko	
Malawi	Japan			Peru	
Mozambique	Russland				
Namibia	Saudi-Arabien				
Südafrika					
Tansania					
Sambia					
Zimbabwe					

<sup>34</sup> Diese wurden hauptsächlich mittels Desktop-Analysen und teilweise durch studentische Abschlussarbeiten durchgeführt. Die Länderauswahl wurde so getroffen, dass im Wesentlichen einerseits Staaten dabei waren, die bereits zu den energieexportierenden Ländern gehören und andererseits Staaten, die aufgrund ihrer Größe und der vermuteten EE-Potenziale als relevante Exportländer galten. Die Bundesrepublik Deutschland und Japan wurden als Nettoimporteure zum Vergleich integriert.

Dabei wurde ein breites Spektrum an Informationen erhoben, die sich unter folgenden Punkten subsumieren lassen:

- Geografische Informationen
- Bevölkerungstatische Daten
- Sozial- und Bildungssituation
- Wohlstandssituation
- Daten zu Energieverbrauch und –produktion sowie Sektorregulierung allgemein
- Daten zur Situation erneuerbarer Energien im Besonderen
- Zustand der Infrastruktur
- Politische Situation
- Klimapolitische Positionierung
- Handelsbeziehungen
- Stand und Planungen bzgl. Produktion und Export von synthetischen Kraftstoffen samt Vorprodukten

Diese Daten geben u.a. Einblicke hinsichtlich des Entwicklungsstands der Länder im Bereich einiger SDGs, ihrer politischen Stabilität sowie generell der Achtung der Menschenrechte. Um die Robustheit der Handelsbeziehungen bestmöglich gewährleisten zu können, sind diese Faktoren von hoher Bedeutung und sollten bei der späteren Auswahl der Partnerländer dringend einfließen (vgl. Abschnitt 9.5.1, in dem der Zusammenhang zwischen der Achtung der SDGs und der Robustheit der Handelsbeziehungen geschildert wird).

Insbesondere erlauben sie jedoch einerseits eine Einschätzung der gegenwärtigen Versorgungssituation bei Energie und eine Abschätzung zukünftiger Bedarfe. Andererseits geben sie Aufschluss über die „H<sub>2</sub>-readiness“<sup>35</sup> des jeweiligen Landes. Der Begriff H<sub>2</sub>-readiness beschreibt in diesem Zusammenhang das Ausmaß, in dem die Voraussetzungen für eine gegenwärtige oder zukünftige Produktion von Wasserstoff gegeben sind. Zu diesen Voraussetzungen zählen<sup>36</sup>:

- Fachwissen und dessen Weitergabe durch Bildungsmaßnahmen
- technische Kompetenz und Forschungsaktivitäten
- bereits vorhandene Produktions- und Infrastrukturkapazitäten
- sowie die begleitenden gesetzlichen Regulierungen für erneuerbare Energien und Wasserstoff

H<sub>2</sub>-readiness ist des Weiteren als Näherung für „SynFuel-readiness“ zu verstehen. In der Praxis werden i.A. von Staaten, zumindest bisher, keine übergreifenden Strategiepapiere über Produktion und Einsatz synthetischer Kraftstoffe erstellt. Im Fokus entsprechender Erwägungen steht bisher der Wasserstoffhochlauf, der insofern pars pro toto zur Verortung eines Landes herangezogen wird. Die momentane strategische Aufstellung der Länder mit Blick auf den

---

<sup>35</sup> 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 2013])

<sup>36</sup> Dieses Kriterienset wurde vom IZES im Rahmen des laufenden Projekts „Global H<sub>2</sub>-Upscaling (FKZ 03E11046, gefördert vom BMWK aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages) entwickelt und wird hier in einer vereinfachten Form genutzt.

in Entwicklung begriffenen globalen Wasserstoffmarkt ist somit der vierte bedeutsame Punkt, der im Rahmen dieser Länderanalysen sichtbar gemacht werden kann. Dabei zeigte sich seit dem Start von BEniVer im Jahr 2018 im Laufe der Untersuchungen, dass Wasserstoff bzw. synthetische Kraftstoffe eine immer stärkere Rolle in den nationalen Policies spielen.

### **9.3.2 Empiriegeleitete Entwicklung einer Ländertypologie**

Der systematische Vergleich über die diversen Einzelfallanalysen hinweg zeigte auf, dass schlussendlich drei der oben genannten Voraussetzungen für die H<sub>2</sub>-readiness genügen, um hinreichend präzise Typen von Ländern zu bestimmen, die bei der Entwicklung von grundlegenden Typen von Markteinführungsinstrumenten zu unterscheiden sind. Dabei handelt es sich zum einen um die strategische Positionierung eines Landes im Hinblick auf seine zukünftige Rolle in einem globalen Wasserstoffmarkt und zum anderen die Ressourcen, die ihm dafür zur Verfügung stehen, welche sich in seine Potenziale für den Ausbau erneuerbarer Energien sowie seine H<sub>2</sub>-readiness unterteilen.

Die verfügbaren Kapazitäten eines Landes zur nachhaltigen Energieerzeugung sind nicht beliebig ausbaubar. Die Positionierung, die im Wasserstoffhandel angestrebt wird, und die Fortentwicklung der H<sub>2</sub>-readiness stehen demgegenüber noch stärker im eigenen Ermessen. Prinzipiell besteht ein Zusammenhang zwischen den verfügbaren Potenzialen und einer wählbaren strategischen Ausrichtung. Das bedeutet aber nicht, dass sie zwingend aufeinander folgen müssten. So kann etwa ein Land mit EE-Potenzialen unterhalb der Eigenbedarfsdeckung eine Exportstrategie wählen, um vom Handel zu profitieren. Unter der Prämisse, dass es die eigenen Klimaziele erfüllen will, müsste stattdessen u. U. neben einer Strategie der Selbstversorgung sogar noch zusätzlich auf Importe gesetzt werden. Je nach Prämisse bietet sich für ein gegebenes Land also eine bestimmte Strategie an; dennoch kann es als souveränes Land frei wählen, auf welche es zurückgreifen möchte. Genau so ist es möglich, dass in einem Land mit nutzbaren Potenzialen ein Meinungsbildungsprozess zur Positionierung auf einem zukünftigen Wasserstoffmarkt in den Regierungen noch gar nicht in Gang gekommen ist oder sich noch in einem sehr frühen Stadium befindet. Dies gilt es, bei der Zuordnung der Länder anhand der genannten drei Elemente zu berücksichtigen, die im Folgenden näher inhaltlich bestimmt werden.

### **Strategische Positionierung in Bezug auf H<sub>2</sub> und SynFuels**

Um die Strategie eines Landes zu beschreiben bzw. den vier grundlegend möglichen Ausrichtungen, die weiter unten beschrieben werden, zuzuordnen, werden drei Faktoren herangezogen, von denen zwei auf den öffentlichen Willensbekundungen der jeweiligen Landesregierungen basieren. Dabei handelt es sich zum einen um ein ggf. genutztes Narrativ, in welches der Aufbau einer Wasserstoffproduktion dezidiert eingebettet wird, um die Motivation dieses Schrittes zu begründen sowie in der eigenen Wirtschaft und Bevölkerung Unterstützung für dieses Projekt zu gewinnen. Zum anderen, und damit tendenziell verbunden, zu betrachten ist die Identifizierung neuer Exportmärkte, welche mittels der Wasserstoffproduktion gewinnbringend erschlossen werden sollen. Der dritte Faktor ist ergänzend die Untersuchung des strategischen Rahmens, also die Überprüfung, inwieweit die vorgenannten Verlautbarungen sich in konkret ausgearbeiteten Dokumenten wiederfinden und welchen Grad an Verbindlichkeit diese

Dokumente aufweisen. Gibt es gar keine Strategiepapiere und nur Einzeläußerungen von Politikern der Regierung, ist das nur bedingt aussagekräftig und muss als vorläufiges Fehlen einer Strategie eingestuft werden. Von solchen Fällen abgesehen, sollte allerdings der selbst erklärte und dokumentierte Wille eines Landes ausschlaggebend für die Zuordnung zu den Strategietypen sein. Regierungen, die durch offizielle Stellungnahmen klare Ziele für die zukünftige Ausrichtung der Wasserstoffwirtschaft ihres Landes zum Ausdruck bringen, sind in dieser Absicht erst einmal beim Wort zu nehmen. Eine Qualifizierung der vorhandenen Kapazitäten eines Landes, seine Pläne tatsächlich zu realisieren, kann dann mittels der Einteilung in hohe oder niedrige H<sub>2</sub>-readiness erfolgen.

### **H2-readiness**

Die Bestimmung der H<sub>2</sub>-readiness erfolgt gleichfalls mittels dreier Faktoren, die anhand der Analyse von Gesetzestexten und begleitender Sekundärquellen erschlossen werden können. Es ist dafür zu prüfen, inwieweit ein regulatorischer Rahmen für den Wasserstoffausbau bereits installiert wurde. Gleiches gilt im Hinblick auf den regulatorischen Rahmen, welcher den Ausbau erneuerbarer Energien begleitet. Weiterhin wird untersucht, ob und inwiefern innerhalb des betrachteten Landes bereits (grüner) Wasserstoff hergestellt und genutzt wird, und inwieweit eine geeignete (Export)Infrastruktur dafür bereits vorhanden ist. Diese Erkenntnisse geben Aufschluss darüber, wie weit ein Staat bei der Entwicklung und Etablierung der Rahmenbedingungen schon gekommen ist, derer es für den Hochlauf einer Wasserstoffproduktion größeren Ausmaßes bedarf. Dabei ist H<sub>2</sub>-readiness nicht als klare polare Unterscheidung zu verstehen, sondern als ein Kontinuum, in dem ein Staat mehr oder weniger weit fortgeschritten sein kann.

### **EE-Potenziale**

An dieser Stelle soll es nicht darum gehen, konkrete Grenzwerte zu benennen. Die Bestimmung der Potenziale erneuerbarer Energie innerhalb eines Landes und des zukünftigen Bedarfs hinsichtlich der Selbstversorgung hängen immer sehr stark von den definierten Randbedingungen und einbezogenen Annahmen ab. Für die untersuchten Länder hat sich jedoch gezeigt, dass viele ein Potenzial aufweisen, welches die eigenen Bedarfe aller Voraussicht nach deutlich überschreiten wird. In diesem Sinne wird für die Nutzbarmachung der vorliegenden Typologisierung ein Abgleich der EE-Potenziale eines Staates mit einem für die Erreichung der Klimaschutzziele von Paris als kompatibel angenommenen<sup>37</sup> Energiebedarf herangezogen und die Länder danach unterschieden, ob die veranschlagten Produktionskapazitäten ober- oder unterhalb des angenommenen Eigenbedarfs liegen.

Den Möglichkeitenraum, der sich daraus für eine Typologisierung aufspannt, zeigt Tabelle 9-8.

---

<sup>37</sup> Mit dem IEA-Net-Zero-Szenario [IEA 2022b] kompatiblen Werten, die auf einer Pro-Kopf-Basis ermittelt wurden.

**Tabelle 9-8:** Schematische Ländergruppenmatrix

	(I) Keine formulierte Strategie	(II) import- orientiert	(III) Strategie der Selbst- versorgung	(IV) Exportstrategie
A) EE-Potenziale oberhalb Eigenbedarf mit H <sub>2</sub> -readiness	(a)	(b)	(c)	(d)
B) EE-Potenziale oberhalb Eigenbedarf ohne H <sub>2</sub> -readiness	(e)	(f)	(g)	(h)
C) EE-Potenziale unterhalb Eigenbedarf mit H <sub>2</sub> -readiness	(i)	(j)	(k)	(l)
D) EE-Potenziale unterhalb Eigenbedarf ohne H <sub>2</sub> -readiness	(m)	(n)	(o)	(p)

Wie oberhalb bereits angesprochen, erlaubt dieses Vorgehen eine grundlegende Typologisierung von Ländern, die zukünftig an einem globalen Wasserstoffmarkt partizipieren wollen. Da die Zuordnung zu einer Strategie aufgrund öffentlich zugänglicher Erklärungen erfolgt, kann es mitunter schwierig sein, diese zweifelsfrei vorzunehmen, etwa wenn Äußerungen zur eigenen Rolle am Wasserstoffmarkt uneindeutig bleiben. Außerdem gibt es Länder, die von vornherein mehrere Strategien verfolgen, also z. B. ihre Wasserstoffproduktion teilweise zur Dekarbonisierung ihrer eigenen Wirtschaft nutzen wollen, aber gewisse Derivate für den Export einplanen, um sich bestimmte Marktsegmente federführend zu sichern. Aus theoretischen wie praktischen Gründen wurde darauf verzichtet, für solche Fälle zusätzliche Zwischenkategorien hinsichtlich der Strategien zu eröffnen. Das würde mehr Unklarheit schaffen und zu wenig zusätzlichem Erkenntnisgewinn führen, wie im Anschluss noch gezeigt werden wird. Stattdessen wird in diesen Fällen von einer „Doppelstrategie“ gesprochen, bei der ein Land nicht eindeutig einer der obigen 16 Zellen zugeordnet werden kann. Die Zuordnung basiert in solchen Fällen auf der von dem betreffenden Land primären Strategie – entweder in der zeitlichen Abfolge oder der relativen Gewichtung. Wer zunächst die eigenen Bedarfe abdecken will, gilt als Selbstversorger, unbenommen, dass später Exporte auf den Weltmarkt erfolgen können. Die Positionierung eines Landes innerhalb der Typologie ist somit als relativ und ggf. nur temporär gültig anzusehen.



Die Typologie der Ländergruppen wurde als Messinstrument zur Einordnung der möglichen Teilnehmer an einem Markt entworfen, der sich selbst noch in einer sehr frühen Entwicklungsphase befindet. Nach dem derzeitigen Stand des politischen Diskurses, der vielfältigen wissenschaftlichen Beschäftigung mit Produktionstechnologie und Anwendungsfeldern von Wasserstoff sowie einem noch immer steigenden Interesse vonseiten der Wirtschaft an der Thematik, ist von einer dynamischen Entwicklung des Marktgeschehens in einem derzeit hoch dynamischen Politikfeld auszugehen. Die Rolle, die ein Land darin einnimmt, hängt von verschiedenen Faktoren ab, wie etwa der Schnelligkeit, mit der technische Entwicklungen realisiert werden, Veränderungen innerhalb der Regierung bzw. Regierungswechsel, internationale Konkurrenz, usw. Tendenziell stabil, weil physikalisch bedingt (jedoch teilweise vom technischen Fortschritt abhängig), sind allenfalls die vorhandenen EE-Potenziale<sup>38</sup>. H<sub>2</sub>-readiness und Strategie hingegen sind Resultate variabler gesellschaftlicher Entwicklungen. Aus diesem Grund ist die hier aufgestellte Typologie bewusst darauf ausgelegt, diese dynamische Entwicklung der Positionierung von Ländern in einem zukünftigen Wasserstoffmarkt nachvollziehen zu können. Die entwickelte Typologie ist darum gerade nicht statisch angelegt, sondern gezielt fluide konzipiert. Jede Einteilung kann nur als Momentaufnahme zu einem bestimmten Zeitpunkt verstanden werden, die aber durch Wiederholung über mehrere Zeitpunkte hinweg die Entwicklung der Rolle eines Landes am Markt nachzeichnen kann. Sie hat insofern keinen Anspruch auf einen prognostischen Nutzen.

Was dieser Typologie im Rahmen der Entwicklung von Markteinführungsmechanismen, und darüber hinaus im Rahmen einer wertegeleiteten Politik im Sinne von Nachhaltigkeit, zusätzlichen Nutzen verleiht, ist die Möglichkeit, jeder Ländergruppe unabhängig von deren momentaner Zusammensetzung sinnvolle Handlungsstrategien zuzuordnen, die sich aus der Positionierung eines Landes am Markt bzw. in einer der 16 Zellen unmittelbar ergeben. Diese Strategien sind von den gesetzten Prämissen abhängig. Zieht man dazu die SDGs und die Klimaziele heran, folgt daraus, dass die effektivste Zielsetzung darin besteht, ein Land im ersten Schritt – d.h. der Beachtung der Aspekte der H<sub>2</sub>-readiness - entsprechend seiner Potenziale und Bedarfe an erneuerbaren Energien in den entstehenden Markt einzubinden. In weiteren Schritten können dann zusätzliche Kriterien (vgl. hierzu Abschnitt 9.5.1 für die Verbindung zwischen der Beachtung der SDGs und der Robustheit der Handelsbeziehungen) einbezogen werden. Für Länder mit Potenzialen unterhalb ihrer prognostizierten Bedarfe (Zeilen C-D) empfiehlt sich, die eigenen Ressourcen zu nutzen, um möglichst große Teile des Eigenbedarfs zu decken. Reicht dies nicht aus, wird eine Ergänzung durch Importe notwendig sein. Länder mit Potenzialen oberhalb der eigenen Bedarfe (Zeilen A-B) sollten einerseits darauf hinarbeiten bzw. Unterstützung dabei erhalten, ihre eigenen Klimaziele durch Nutzung der eigenen Ressourcen zu erreichen. Überschüsse, die sie darüber hinaus produzieren, können sie auf dem Weltmarkt anbieten.

Ließen sich alle Länder in diese zwei Gruppen entwickeln, gelangte man zur systemisch effektivsten und effizientesten Nutzung der globalen Wasserstoffpotenziale. Für jeden Ländertyp kann eine entsprechende Strategie angewandt werden. Hier wird die Unterscheidung zwischen Ländern mit Potenzialen oberhalb der eigenen Bedarfe und unterhalb der eigenen Bedarfe wichtig. Unterhalb der eigenen Bedarfe geht es zunächst darum, diese Länder in einer

---

<sup>38</sup> Deren verfügbare Größenordnung jedoch, wie bereits angemerkt, letztlich erst durch wissenschaftlich oder politisch gesetzte Annahmen bestimmt wird, und somit gleichfalls dem Zugriff des gesellschaftlichen Diskurses unterliegt.

kooperativen Form und unter Beachtung der Beschlüsse der UN-Klimaschutzkonferenz COP 27 in Sharm el-Sheikh zum Fonds bzgl. der „losses and damages“ darin zu unterstützen, H<sub>2</sub>-readiness zu erreichen, um auf diesem Wege zu einer Strategie der Selbstversorgung zu gelangen. Länder mit Potenzialen oberhalb der eigenen Bedarfe andererseits sollten, sobald sie H<sub>2</sub>-readiness erreicht haben, durch entsprechende Anreize bzw. Unterstützung dazu bewegt werden, ihre Überschusskapazitäten auf dem Weltmarkt anzubieten. Anhand der Einteilung in die 16 Zellen der Typologie lässt sich leicht ersehen, welcher Status einem Land zu einem bestimmten Zeitpunkt zugeordnet werden kann, und welche Art von Strategie entsprechend, im Sinne dieser Entwicklung, anzustreben ist. In der Folge kann durch eine fundierte empirische Analyse der Kontextfaktoren (vgl. Abschnitt 9.3.1) und eine darauf aufbauende vertiefte TIS-Analyse der einzelnen Staaten (vgl. Abbildung 9-2) eine an das jeweilige Land angepasste Kooperationsform entwickelt werden.

Im Hinblick auf die Markteinführungsmechanismen kann man sich genau die gleiche Überlegung zunutze machen. Allerdings wird in diesem Kontext eine Konzentration auf die Länder mit Produktionskapazitäten oberhalb des angenommenen Eigenbedarfs erfolgen, da die übrigen acht Typen nicht signifikant zum Markthochlauf in Deutschland und Europa beitragen können, bzw. die Nutzbarmachung ihrer Potenziale gegen die Anforderungen der Nachhaltigkeit verstoßen würde.

### **9.3.3 Zum Umgang mit den Ländertypen im Hinblick auf die MEM**

MEM können gezielt dazu eingesetzt werden, Länder zu unterstützen, sich von einem Typ/ aus einer Zelle zu einem anderen Typ/ in eine andere Zelle (vgl. Tabelle 9-8) zu entwickeln. Im Sinne eines beschleunigten Markthochlaufs von synthetischen Kraftstoffen sind hier insbesondere Länder der Zellen (e), (g), (h) oder (c), die sich nach (d) entwickeln könnten, von Interesse.

Zelle (a) bleibt in der Praxis voraussichtlich unbesetzt. Kaum ein Land nutzt Wasserstoff bisher so ausgiebig, dass eine umfassende H<sub>2</sub>-readiness bereits gegeben wäre. Ohne dass eine Strategie formuliert wurde, zu deren Umsetzung ein entsprechender Rahmen errichtet werden soll, wird er infolge dessen kaum aufgebaut werden.

**Typ A) Länder** besitzen im Wesentlichen die Voraussetzungen, um unmittelbar in den Wasserstoffhandel einzutreten, sofern der Wille dazu besteht. Ein Technikaustausch oder F&E-Förderung werden eher punktuell eine Rolle spielen, falls überhaupt. Hier steht es eher im Vordergrund, Anreize zur Wasserstoffproduktion zu setzen und faire Handelsbedingungen und einen geeigneten Rahmen (z.B. Zertifizierung) zu etablieren.

**Typ B) Länder** hingegen verfügen zwar über die grundlegenden physikalischen und teils politischen Voraussetzungen, um Partner im Wasserstoffhandel zu werden, doch mangelt es noch im Hinblick auf die notwendigen Regulierungen und eventuelle technische Fähigkeiten. Länder, die Exportwilligkeit und Potenzial auf sich vereinen, denen es aber noch an H<sub>2</sub>-readiness fehlt, werden länger benötigen, bis sie signifikante Mengen produzieren können, um genug Überschüsse für einen Einstieg in den globalen Markt zu erzeugen. Hier kann durch Bereitstellung von Know-how sowie Kapazitätsaufbau innerhalb des Landes zur Beschleunigung des Markthochlaufs beigetragen werden. Speziell relevant sind hier die Länder in Zelle (e), die

über große Potenziale verfügen, deren Meinungsbildungsprozess aber noch nicht abgeschlossen ist. Durch gezieltes Setzen von Anreizen bzw. Kooperationen können hier wahrscheinlich zusätzliche Länder für einen Wasserstoffhandel zu fairen Bedingungen gewonnen werden.

**Typ C) und Typ D) Länder** sind keine Zielländer für Strategien im Rahmen der Markteinführung von synthetischen Kraftstoffen. Einerseits ist dort eher die Produktion marginaler Mengen zu erwarten, andererseits werden diese begrenzten Mengen besser im Inland selbst genutzt, um eigene Bedürfnisse und Klimaschutzziele zu bedienen. Der Aufwand stünde hier weder in einem lohnenden Verhältnis zum Ertrag, noch könnte es zu einem Handel kommen, der den Anforderungen an Nachhaltigkeit genügen würde.

Im Übrigen ist der Umgang mit den Ländertypen weniger eindeutig. Grundsätzlich sollte dem erklärten Willen eines Landes – auch aufgrund der Achtung des Prinzips der Souveränität – Respekt entgegengebracht werden, sofern diese zunächst ihre eigene Wirtschaft dekarbonisieren wollen. Gleichwohl gibt es in diesen recht heterogenen Ansammlungen von Staaten Länder, die von einer Partnerschaft profitieren könnten, insbesondere unter den Typ B) Ländern. Hier ist die Know-how-Bereitstellung eine Option, um im Gegenzug gewisse Kontingente der Produktion handeln zu können.

Grundlage jeder Maßnahme sollte jedenfalls eine an den Nachhaltigkeitsprinzipien orientierte (vgl. Abschnitt 9.1.1), wertebasierte, integrierte Basisstrategie sein, die orientiert an der vorgeschlagenen Typologie, je nach Kapazität und Ausrichtung der Länder, unterschiedliche Stufen bzw. Maßnahmen zur Aktivierung parat hält. Das enthebt beim Einsatz eines Markteinführungsmechanismus gegenüber einem bestimmten Zielland allerdings nicht von der Notwendigkeit einer Prüfung, ob landesspezifische Faktoren gegeben sind, welche den Mechanismus unwirksam machen könnten oder unerwünschte Nebeneffekte bei seinem Einsatz bedingen. Da diese Mechanismen problemorientiert konzipiert werden, ist in einem solchen Fall eine Anpassung des Markteinführungsmechanismus für landes- bzw. fallspezifische Bedürfnisse zu erwägen oder der Einsatz eines geeigneteren Instrumentes zu beschließen.

**Staaten ohne ausformulierte Strategie** haben entweder die Wasserstoffthematik nicht für sich entdeckt oder befinden sich noch in einem Prozess der Strategieentwicklung. Insbesondere Länder mit Produktionspotenzialen oberhalb des Eigenbedarfs sollten dann durch entsprechende Anreize und Angebote motiviert werden, diese Potenziale zu aktivieren. Eine Entwicklung in Richtung H<sub>2</sub>-readiness anzustoßen ist das erste Ziel, verbunden mit einer Adressierung eigener Bedarfe, die dann in den Export von Überschüssen ausgeweitet wird.

**Importorientierte Staaten** sind im Wesentlichen eher als Konkurrenten auf dem Weltmarkt zu betrachten. Mit diesen einen ausgeprägten Handel anstoßen zu wollen, ist wahrscheinlich wenig sinnvoll, da in den meisten Fällen von großem Eigenbedarf auszugehen ist. In diesem Kontext wären eher übergeordnete Überlegungen dahingehend abzuwägen, ob eine Strategie angewendet werden sollte, die sich angelehnt an Prozesse zur Entwicklung globaler Standards, international dafür einsetzt, dass möglichst viele Staaten (inkl. der Bundesrepublik selbst) danach streben sollten, ihre Bedarfe soweit wie möglich selbst zu decken, um ausufernde Konkurrenz auf dem Markt zu vermeiden und alle Länder dazu anzureizen, eigene Produktionskapazitäten systematisch zu nutzen.

**Staaten mit Strategie der Selbstversorgung** kann eine Partnerschaft angeboten werden, die sie zunächst darin unterstützt, den eigenen Markthochlauf zu beschleunigen, um rascher in eine Position eines den Nachhaltigkeitskriterien genügenden Exports zu gelangen. Der Versuch, auf Exporte zu drängen, bevor die eigenen Bedarfe im selbst bestimmten Maße gedeckt werden können, sollte im Rahmen nachhaltigen Handelns unterbleiben. Insbesondere Länder in Zelle (g) könnten mit unterstützenden Maßnahmen begleitet werden, um gleichsam den Rahmen für einen nachhaltigen Handel aufzubauen.

**Staaten mit Exportstrategie** sollten vorrangige Zielländer für Markteinführungsmechanismen sein. Zentrale Maßnahmen beinhalten dann ggf. punktuelle Unterstützung zu liefern, um den Markthochlauf soweit wie möglich zu beschleunigen. Parallel dazu ist sicherzustellen, dass der Wasserstoffhandel unter fairen und nachhaltigen Bedingungen erfolgen kann.

Eine detailliert aufgeteilte Übersicht der Stoßrichtung von Strategien gibt Tabelle 9-9.

**Tabelle 9-9:** Empfehlungen für den strategischen Einsatz von MEM zum Aufbau eines globalen Wasserstoffmarktes

	(I) Keine formulierte Strategie	(II) Importorientiert	(III) Strategie der Selbstversorgung	(IV) Exportstrategie
<b>A) EE-Potenziale oberhalb Eigenbedarf mit H<sub>2</sub>-readiness</b>	<b>(a) Typ in der Realität sehr unwahrscheinlich -&gt;für MEM eher uninteressant</b> Anreize für einen Export von Produktionsüberschüssen setzen Zielzelle: (c)/(d)	<b>(b) Anreize für einen Wechsel zur Strategie der Selbstversorgung setzen ggf. mit Export von Überschüssen</b> Zielzelle: (c)/(d)	<b>(c) Anreize für einen Export von Produktionsüberschüssen setzen</b> Zielzelle: (c)/(d)	<b>(d) Sicherstellung nachhaltigen Handels</b> Zielzelle: (d)
<b>B) EE-Potenziale oberhalb Eigenbedarf ohne H<sub>2</sub>-readiness</b>	<b>(e) Aufbau von H<sub>2</sub>-Readiness und Anreize für einen Export von Produktionsüberschüssen setzen</b> Zielzelle: (c)/(d)	<b>(f) Aufbau von H<sub>2</sub>-Readiness und Anreize für einen Wechsel zur Strategie der Selbstversorgung setzen ggf. mit Export von Überschüssen</b> Zielzelle: (c)/(d)	<b>(g) Aufbau von H<sub>2</sub>-Readiness und Anreize für einen Export von Überschüssen setzen</b> Zielzelle: (c)/(d)	<b>(h) Aufbau von H<sub>2</sub>-Readiness und Sicherstellung nachhaltigen Handels</b> Zielzelle: (d)
<b>C) EE-Potenziale unterhalb Eigenbedarf mit H<sub>2</sub>-readiness</b>	<b>(i) für MEM nicht interessant</b> Weitest gehende Selbstversorgung ggf. in Kombination mit Importen nahe legen Zielzelle: (k)	<b>(j) für MEM nicht interessant</b> Ergänzung um Selbstversorgung um Bedarf an Importen zu minimieren Zielzelle: (k)	<b>(k) für MEM nicht interessant</b> Ggf. kein unterstützendes Handeln nötig Zielzelle: (k)	<b>(l) für MEM nicht interessant</b> Wechsel zur Strategie der Selbstversorgung anzuraten Zielzelle: (k)
<b>D) EE-Potenziale unterhalb Eigenbedarf ohne H<sub>2</sub>-readiness</b>	<b>(m) für MEM nicht interessant</b> Aufbau von H <sub>2</sub> -Readiness, um weitest gehende Selbstversorgung ggf. in Kombination mit Importen zu ermöglichen Zielzelle: (k)	<b>(n) für MEM nicht interessant</b> Aufbau von H <sub>2</sub> -Readiness, um Bedarf an Importen durch weitest gehende Selbstversorgung zu minimieren Zielzelle: (k)	<b>(o) für MEM nicht interessant</b> Aufbau von H <sub>2</sub> -Readiness, um Selbstversorgung zu ermöglichen Zielzelle: (k)	<b>(p) für MEM nicht interessant</b> Aufbau von H <sub>2</sub> -Readiness und Anraten eines Wechsels der Strategie zur Selbstversorgung. Zielzelle: (k)

### **Empfehlungen für den strategischen Einsatz von MEM zum Aufbau eines globalen Wasserstoff- & SynFuel-Marktes**

MEM sollten den Kapazitätsausbau in den Zielländern befördern, orientiert an den jeweiligen Voraussetzungen und Absichten, wie die typologische Zuordnung sie umreißt. Angesichts knapper finanzieller und personeller Kapazitäten empfiehlt sich ein gestaffeltes Vorgehen zur Entwicklung eines globalen Wasserstoffmarktes, über den die Bundesrepublik (die EU) die benötigten Importe organisieren kann. Zu bevorzugen sind dabei zunächst jene Länder mit Potenzialen an erneuerbaren Energien, die oberhalb der absehbaren Eigenbedarfe liegen und durch einen relativ hohen Grad an H<sub>2</sub>-readiness möglichst zeitnah in die Produktion einsteigen können. Der Fokus von MEM wird entsprechend, zumindest zu Beginn, auf Typ A) und Typ B) Ländern liegen, vorwiegend solchen, die auf eine Exportstrategie setzen oder noch unentschieden sind. Mit fortschreitendem Hochlauf des globalen Wasserstoffmarktes können weitere Länder sukzessive in die Entwicklung mit eingebunden werden, was in zweierlei Hinsicht Vorteile aufweisen würde: Einerseits wirkt es dem Risiko entgegen, dass einzelne Staaten, die mehr als für ihren Bedarf produzieren, Wasserstoffkontingente für den Handel auf dem Weltmarkt zurückhalten. Andererseits ermöglicht es der Bundesrepublik Deutschland bzw. der EU als Importeure eine Diversifizierung der Bezugsländer, wodurch die Schaffung neuer Abhängigkeiten im Energie- und Kraftstoffhandel begrenzt werden kann. Optional könnten mittel- bis langfristig flankierende Maßnahmen darauf setzen, möglichst viele Staaten dazu zu bewegen, Wasserstoff bzw. synthetische Kraftstoffe primär zur (partiellen) Selbstversorgung zu produzieren, um in Kombination mit einem auf nationalen Überschüssen basierenden diversifizierten Welthandel zu einer global nachhaltigen und auch für das Gesamtsystem auf Ressourceneffizienz hin optimierten Bedarfsdeckung zu gelangen. Bei Letzterem handelt es sich allerdings mehr um eine gesamtsystemische Perspektive, aus der heraus eine feine Abstimmung vorhandener Produktionskapazitäten mit bestehenden Bedarfen als, im Rahmen gesetzter Zielstellungen sinnvoll und wünschenswert begründet werden kann. Markteinführungsmechanismen, die den Zweck verfolgen, überhaupt erst einen Markthochlauf anzustoßen, werden sich eher nicht auf Optimierungsfragen fokussieren. Sie von Beginn an zu integrieren, kann allerdings der Erzeugung unbeabsichtigter Nebeneffekte sowie der Schaffung ungewollter Pfadabhängigkeiten entgegenwirken.

#### **9.3.4 Zwischenfazit: Einfluss der methodischen Grundlagen auf die MEM-Entwicklung**

Wie sich im Abschnitt zu den methodischen Grundlagen zeigen ließ, besteht ein sehr breites Spektrum an Markteinführungsmechanismen, aus dem heraus sich für jede gegebene Aufgabenstellung theoretisch fundiert ein Bündel geeigneter Instrumente passgenau entwickeln lässt. Entsprechende Maßnahmen zur Etablierung eines Marktes für synthetische Kraftstoffe werden sich nicht auf die Bundesrepublik Deutschland beschränken lassen, sollen sie effektiv sein. Da nach derzeitigem Kenntnisstand nicht davon auszugehen ist, dass die Bundesrepublik ihre Bedarfe an synthetischen Kraftstoffen vollumfänglich selbst erzeugen können, muss es zusätzlich darum gehen, die Produktion synthetischer Kraftstoffe im Ausland zu fördern und in geeignete Handelspartnerschaften einzusteigen.

Im vorliegenden Abschnitt wurde zu diesem Zweck auf dem Weg der Analyse relevanter Staaten eine fluide Typologie entwickelt, mit der sich Staatengruppen bilden lassen, für die jeweils ein Bündel geeigneter Markteinführungsmechanismen zusammengestellt werden und dann

nach Bedarf eingesetzt werden kann. Die grundsätzliche Stoßrichtung, in welche diese Strategien zielen sollten, ist somit etabliert. Gleichzeitig wurde bereits eine Reihe von Aspekten angesprochen, die einer weiteren empirischen Vertiefung bedürfen, um die bestehenden Herausforderungen zu verdeutlichen und die darauf antwortenden Markteinführungsmechanismen weiter zu plausibilisieren.

Gemäß den unter Abschnitt 9.1.2 genannten notwendigen Funktionen eines technologischen Innovationssystems, die erfüllt sein sollten, um ein neues Produkt in den Markt einführen zu können, ist in Bezug auf die synthetischen Kraftstoffe festzustellen, dass hier fast alle wesentlichen Voraussetzungen noch nicht gegeben sind. Die Erarbeitung der notwendigen Markteinführungsmechanismen muss sich daher an die noch eher geringe Produktreife anpassen. Gleiches gilt für die zu schaffenden Rahmenbedingungen in den Bereichen, in denen synthetische Kraftstoffe eingesetzt werden sollen. Im folgenden Kapitel werden daher die aktuell bestehenden Rahmenbedingungen in den drei Verkehrsbereichen analysiert.

## **9.4 Regulatorische Rahmenbedingungen im Verkehrssektor und Konsequenzen für die Einführung synthetischer Kraftstoffe**

In allen drei Bereichen des Verkehrssektors kann eine Markteinführung synthetischer Kraftstoffe nicht ohne die Beachtung der bisherigen Regularien dieser Teilbereiche des „technologischen Innovationssystems synthetische Kraftstoffe“ gelingen. In den folgenden Abschnitten wird aufgrund der im Rahmen von BEniVer unternommenen Analysen dieser Regularien (durch Recherchen in den relevanten Gesetzestexten und der Literatur, Interviews mit unterschiedlichen Stakeholder\*innen und einen Workshop zum Thema nachhaltige Schifffahrt im Mai 2022) erläutert, welche regulatorischen Rahmenbedingungen gegenwärtig anzutreffen sind, die einen maßgeblichen Einfluß auf die Einführung von synthetischen Kraftstoffen, sowie teilweise auch auf die Umsetzung anderer, gesamtsystemisch notwendiger Klimaschutzmaßnahmen haben. Diese können eine hemmende genauso wie eine unterstützende Wirkung haben. Auf der Basis dieser Analyse des Status quo werden jeweils besonders relevante Punkte für eine robuste Markteinführung skizziert, die auf die (in Abschnitt 9.1.1 und Abbildung 9-1 dargestellten) Nachhaltigkeitsziele Bezug nehmen.

### **9.4.1 Luftverkehr**

Der Flugverkehr wird mindestens auf der Langstrecke in den meisten Studien als no-regret-Bereich benannt, da eine Elektrifizierung oder ein Betrieb mit flüssigem Wasserstoff nur auf der Kurz- oder Mittelstrecke in Frage kommt [Mukhopadhaya und Rutherford 2022]. Daher wird synthetisches Kerosin im Flugverkehr in großen Mengen benötigt werden (vgl. Abschnitte 6.7 und 6.8). Hierfür muss zunächst eine Produktionsinfrastruktur aufgebaut werden.

#### **Geltende regulatorische Rahmenbedingungen**

Es sind bereits einige Mechanismen in Kraft, die der Markteinführung synthetischer Kraftstoffe im Luftverkehr dienen können, z. B.:

- Seit 2012 ist der Luftverkehr im EU Emission Trading Scheme (ETS) integriert. Betroffen sind Flüge innerhalb der EU und des europäischen Wirtschaftsraums (EWR).
- Carbon Offsetting and Reduction Scheme for international aviation (CORSA) (Pilotphase: 2021-2023, erste Phase – freiwillige Teilnahme: 2024-2026, zweite Phase – alle Staaten: 2026-2035): Ab 2021 können auch alternative Kraftstoffe angerechnet werden. Dies lohnt sich aktuell aber nicht, da Ausgleichsmaßnahmen billiger sind [Capaz et al. 2021]. Die meisten Ausgleichsmaßnahmen sind „vermiedene Emissionen“. Daher wird der Mechanismus z. T. sehr kritisch gesehen, bspw. schreibt der IPCC: „By its nature, CORSIA does not lead to a reduction in in-sector emissions from aviation since the program deals mostly in approved offsets. At its best, CORSIA is a transition arrangement to allow aviation to reduce its impact in a more meaningful way later“ [IPCC 2022].
- Die Luftverkehrsabgabe, die derzeit in Deutschland streckenabhängig erhoben wird, soll laut Koalitionsvertrag [Koalitionsvertrag 2021] der Ampel-Parteien künftig für die Förderung von synthetischem Kerosin verwendet werden.

Zusätzlich ist die PtL-Roadmap vom April 2021 der vorherigen Bundesregierung [Bundesregierung 2021b] – bekräftigt im Koalitionsvertrag der aktuellen Regierung [Koalitionsvertrag 2021]<sup>39</sup> – zu erwähnen, in der eine PtL-Quote<sup>40</sup> angekündigt wird. Diese soll umgesetzt werden, indem für die Branche eine verpflichtende Abnahme der bis zum Jahr 2030 geplanten Produktion von mindestens 200.000 Tonnen PtL-Kraftstoffen gelten soll. Zwischenzeitlich wurde am 21.06.2022 von der Bundesregierung das Arbeitspapier „Klimaneutrale Luftfahrt - Gemeinsames Papier der Bundesregierung“ veröffentlicht, das weitere Zielstellungen der Bundesregierung hierfür zusammenfasst [Bundesregierung 2022c].

Auch auf europäischer Ebene wird an der Umsetzung einer PtL-Quote gearbeitet. Diese ist Teil des sog. „Fit-for 55-Pakets“. Darin sieht ein Beschluss des Europäischen Ministerrats vor, dass einerseits an einer gemeinsamen EU-weiten Infrastruktur für „alternative Kraftstoffe“ gearbeitet werden soll, welche gleiche Voraussetzungen innerhalb der EU für alle schaffen soll. Andererseits soll ein verpflichtender Mindestanteil an sog. Sustainable Aviation Fuels festgelegt werden. Dabei sollen bis 2030 nun mindestens 6% des genutzten Flugkraftstoffs aus SAF bestehen [European Council 2022]<sup>41</sup>, worunter diverse Kraftstoffe biogenen Ursprungs und synthetische Kraftstoffe auf der Basis von EE-Strom gefasst werden. Die genaue Ausarbeitung der Gesetzestexte – sowohl in der Bundesrepublik als auch auf EU-Ebene – steht zum heutigen Zeitpunkt noch aus.

<sup>39</sup> „ambitionierte Quoten für Power-to-Liquid (PtL-Quoten) im Luft- und Schiffsverkehr“ [Koalitionsvertrag 2021]

<sup>40</sup> „eine Verpflichtung der Luftverkehrsunternehmen zur Abnahme relevanter Mengen an PtL-Kerosin in den nächsten Jahren“ [Bundesregierung 2021b, S. 6], wobei die Unterzeichnenden dieser Roadmap (Politik und relevante Verbände) daran arbeiten, „die Produktion von nachhaltig erzeugtem PtL-Kerosin in den nächsten Jahren auf- und auszubauen. Sie halten es für realistisch, dass bis zum Jahr 2030 mindestens 200.000 Tonnen PtL-Kerosin im deutschen Luftverkehr genutzt werden können, das entspricht 2 % des Kerosinabsatzes in Deutschland im Jahr 2019.“ [Bundesregierung 2021b, S. 5]

<sup>41</sup> “The obligation for aviation fuel suppliers to ensure that all fuel made available to aircraft operators at EU airports contains a minimum share of SAF from 2025 and, from 2030, a minimum share of synthetic fuels, with both shares increasing progressively until 2050 (blending mandate and sub-mandate). The general approach also foresees an increase in the minimum share for 2030 from 5 to 6%.” [European Council 2022]

Umgekehrt ist davon auszugehen, dass einige der bestehenden Regelungen auch hemmend bei der Einführung synthetischer Kraftstoffe wirken können, so insb. die explizite Ausnahme der Besteuerung von Kerosin durch die ICAO im Jahr 1944 im Chicagoer Abkommen. Diese Ausnahme wurde damals eingeführt, um den Flugverkehr gezielt zu fördern. Dies wird auch heute noch von der Luftfahrtbranche als gerechtfertigt eingeschätzt<sup>42</sup>, da diese ja die Kosten für die Infrastruktur sowie die Flughafen-, Lärm- und Sicherheitsentgelte übernehme. Um diese Regelung für den internationalen Luftraum aufheben oder abändern zu können, bedürfte es der Zustimmung der 191 Staaten der ICAO, was als extrem unwahrscheinlich gilt. Innerhalb der EU befindet sich eine Besteuerung von Kerosin in Planung, eine Einführung für Inlandsflüge ist gemäß EU-Recht seit 2005 prinzipiell möglich.

### **Resultierende Anforderungen an die Markteinführung**

Während im Luftverkehr aufgrund der Kompatibilität mit fossilem Kerosin die Midstream- und Downstream-Infrastruktur größtenteils weiter genutzt werden kann und sich hier überwiegend geringer Anpassungsbedarf sowie einiger Normierungsbedarf ergibt (vgl. vorherige Kapitel in dieser Roadmap), stellen sich die Anforderungen für den Markthochlauf überwiegend an

- die Reduktion der nicht-CO<sub>2</sub>-bedingten Treibhausgasemissionen,
- die bereitzustellenden Mengen und die gesamtsystemisch effizienteste Form der Produktion von Kerosin,
- die Finanzierung der Markteinführung,
- die Kraftstoffpreise und
- generell die Rolle internationaler Regelungen und Organisationen.

Laut IPCC [IPCC 2022] könnten (aus heutiger Sicht) bis zu 12% der weltweiten Flüge elektrifiziert werden. Beim Betrieb mit flüssigem Wasserstoff stellen sich zudem Herausforderungen aufgrund der höheren Volumina. Insbesondere auf der Kurz- und Mittelstrecke sollten diese Technologien aber für die Markteinführung und für die Förderung von Forschung und Entwicklung verstärkt in den Fokus genommen werden. Ein großer Teil der Klimawirkung der Luftfahrtemissionen ist auf Nicht-CO<sub>2</sub>-Effekte zurückzuführen, insbesondere auf Kondensstreifenzirren („contrail cirrus“, d.h. aus Kondensstreifen gebildete großflächige Zirruswolken) aber auch auf Effekte der Emission von Stickoxiden und ultrafeinen Partikeln [Righi et al. 2013; Lee et al. 2021]. Einige dieser Effekte können auch mit der Einführung von synthetischem Kerosin voraussichtlich nicht vollständig eliminiert werden. Die Wirkungen alternativer Technologien auf diese Effekte müssen weiter erforscht werden. Darüber hinaus wäre es sinnvoll, Nicht-CO<sub>2</sub>-Effekte der Luftfahrt auch bei Nutzung alternativer Kraftstoffe stärker in politisches Handeln einzubeziehen, bspw. durch einen entsprechenden Aufschlag auf den CO<sub>2</sub>-Preis in der Luftfahrt oder durch Förderung des Modal Shifts [IPCC 2022].

Zur Bereitstellung von Kerosin stehen (aus heutiger Sicht) vor allem zwei Prozesse zur Verfügung (die Fischer-Tropsch-Synthese und der Methanol-to-Jet Prozess), deren Output an Kerosin aktuell weniger als die Hälfte des gesamten Outputs ausmacht (~ 30-50 %). Damit entstehen viele Koppelprodukte, für die wiederum Abnehmer benötigt werden. Bei der Fischer-

---

<sup>42</sup> Vgl, die Position des Bundesverbands der deutschen Luftverkehrswirtschaft e.V. [Klimaschutz-Portal 2017]



Tropsch-Synthese sind dies vor allem Benzin oder Diesel, die in zukünftigen Märkten sehr wahrscheinlich nicht mehr oder nicht mehr in der Weise genutzt werden. Im Straßenverkehr sollte in Zukunft die Elektromobilität aufgrund ihres hohen Wirkungsgrades dominieren; im Schiffsverkehr sind in der Produktion weniger energieintensive Kraftstoffe, wie Methanol oder Ammoniak, von Vorteil. Bei der Kerosinbereitstellung über den Methanol-to-Jet Prozess liegt sicherlich ein großer Vorteil darin, dass ein Zwischenschritt über Methanol stattfindet, welches zu den synthetischen Kraftstoffen gehört, die aktuell höhere Effizienzen von über 50 % besitzen und in Zukunft potenziell auch über 60 % erreichen könnten. Methanol könnte damit in zukünftigen Märkten sowohl in der Schifffahrt, als Alternative zu Ammoniak, sowie in der Industrie [Methanol-to-Olefins (MtO)] gefragt sein, da die höhere Effizienz auch einen günstigen Preis für das Produkt ermöglichen könnte. Durch die weiteren potenziellen Abnehmer von Methanol ergibt sich im zukünftigen Markt die Möglichkeit einer größeren Produktion von Methanol mit unterschiedlichen Folgeprozessen und damit potenziell ein zusätzlicher Kostenvorteil. Im heutigen Markt ist der Bedarf an Methanol allerdings noch ein bis zwei Größenordnungen geringer als für Benzin oder Diesel (siehe Abschnitt 3.7, Unterkriterium „angebotsseitige Sicht“). Somit besteht für die FT-Synthese die Frage, inwieweit ihre Koppelprodukte (sofern die Mengeverhältnisse nicht substantiell in Richtung Kerosin-Produktion verschoben werden können) langfristig noch Abnehmer finden können.

Für die Markteinführung besteht damit die Herausforderung, den Prozess zu identifizieren, der über die gesamte Lebensdauer der Anlagen zur bestmöglichen Nutzung jeglicher Produkte führt und damit Ressourcen schont. Da die Effizienz der Prozesse insgesamt allerdings nicht sehr hoch ist (<50 %), ist es zusätzlich zu vermeiden, Produkte zu subventionieren, die den notwendigen Wandel in anderen Bereichen zu weniger energieintensiven Prozessen blockieren oder die Produktion zusätzlicher Stoffe in anderen Bereichen (Schifffahrt und Chemie-Industrie). Hier wäre zu überlegen, inwieweit insb. nicht-monetäre Instrumente (wie z. B. eine Zertifizierung über Herkunftsnachweise), zielgerichtet eingesetzt werden können, um eine Quersubventionierung zu vermeiden.

Aufgrund der besonderen regulatorischen Bedingungen in der Luftfahrt, stellen sich hier **besondere Anforderungen an die Finanzierung der Förderung synthetischer Treibstoffe**: Denn für eine gesamtgesellschaftliche steuerliche Finanzierung eines Infrastruktur-Aufbaus für synthetische Kraftstoffe in der (internationalen) Luftfahrt fehlt aufgrund umfassender Steuerbefreiungen derzeit die normativ-rechtliche Grundlage. Bspw. werden derzeit nur innerdeutsche Flüge mit einer Mehrwertsteuer belegt. Wie oben erwähnt, ist Kerosin zudem – im Gegensatz zur Bahn und zu Kraftfahrzeugen – von der Energiesteuer befreit. Eine Mehrwertsteuer könnte aufgrund internationaler Regelungen momentan nur über deutschem Hoheitsgebiet erhoben werden – wobei gerade die Notwendigkeit innerdeutscher Flüge durchaus kontrovers diskutiert werden kann. Die nach Streckenlänge derzeit erhobene Luftverkehrsabgabe gleicht diese steuerlichen Vorteile in der Regel nicht aus. Da also der Luftverkehr derzeit gegenüber anderen Verkehrsbereichen steuerrechtlich privilegiert ist [Pache 2005], könnte eine Finanzierung der Infrastruktur – darunter auch von Kraftstoffen – der oben beschriebenen international vereinbarten Nutzerfinanzierung, welche die Grundlage für die steuerliche Privilegierung darstellt, widersprechen. Um eine staatliche Förderung von synthetischem Kerosin zu rechtfertigen, wäre eine Besteuerung der Luftfahrt sinnvoll (Verursacherprinzip), wie dies auch das Umweltbundesamt fordert [Burger und Bretschneider 2021]. Alternativ wäre der Aufbau der Produktionsinfrastruktur von der Luftfahrtbranche selbst zu finanzieren. Zusätzlich

wäre eine Verpflichtung zur Beimischung mithilfe von Quoten möglich, wie es von der Bundesregierung im Koalitionsvertrag angestrebt wird. In jedem Fall (Steuerfinanzierung oder Finanzierung durch die Branche selbst) würde dies zu einem Preisanstieg im Luftverkehr führen.

Negative Effekte auf die Luftfahrtbranche sind hier mit positiven Effekten auf Nachfragereduktion und –verlagerung auf andere Verkehrsbereiche abzuwägen. Da der Luftgüterverkehr lediglich 0,2 % des Gesamtgüterverkehrs ausmacht, werden **Produktpreissteigerungen** eher gering ausfallen [UBA 2022c] und ein Einfluss auf die Warenversorgung ist eher unwahrscheinlich. Allerdings stellen sich möglicherweise Verteilungs- und Gerechtigkeitsfragen, wenn bspw. Flugreisen für bestimmte Bevölkerungsgruppen aufgrund des Preises nicht mehr zugänglich sind. Insbesondere auf der Kurzstrecke bietet eine verstärkte Regulierung Chancen, gleichzeitig den Modal Shift auf die Schiene zu befördern und potenzielle Bedarfe an knappen synthetischen Kraftstoffen zu verringern [IPCC 2022].

Für den internationalen Luftverkehr bedarf es **internationaler Regelungen** für den Aufbau und die Planung von Produktionsanlagen und –mengen unter Einbezug der ICAO.

#### **9.4.2 Schiffsverkehr**

Neben dem Flugverkehr zählt auch der Schiffsverkehr zu den no-regret-Bereichen (vgl. die Abschnitte 4.7 und 5.7), in denen zukünftig hohe Bedarfe an synthetischen Kraftstoffen anfallen werden. Dabei sind die strukturellen Anforderungen im Schiffsverkehr komplex. So gibt es zahlreiche Einzelbereiche, für die durchaus unterschiedliche Herausforderungen bestehen: z.B. die Binnenschifffahrt oder die Hochseeschifffahrt und die Personenschifffahrt.

Batterieelektrische Antriebe kommen dabei für die Kurzstrecke ebenfalls in Frage [ITF 2020, 30ff.]. Gleichzeitig stehen auch unterschiedliche synthetische Kraftstoffe zur Verfügung – hier betrachtet wurden Methanol, Diesel, Methan (LNG) und Ammoniak. Auf Grundlage heutiger Erkenntnisse ist hier noch keine klare Aussage möglich, welcher Kraftstoff sich zukünftig durchsetzen wird oder die höchsten Potenziale bietet. Dies stellt natürlich auch Anforderungen an die Markteinführung, da eine Festlegung auf eine Technologie zum heutigen Zeitpunkt verfrüht erscheint. Insbesondere bei Kraftstoffen mit Pilotcharakter (z.B. Ammoniak und Methanol) sind noch Fragen im Hinblick auf Toxizität, Gesundheitsschutz, Lagerung und Handhabung zu erforschen sowie die Frage nach potenziell erhöhten NO<sub>x</sub>, N<sub>2</sub>O oder NH<sub>3</sub>-Emissionen durch Ammoniak zu klären (siehe auch Kapitel 7). Bezüglich dieser und weiterer möglicher Emissionskomponenten sind zudem die Wirkungen auf Klima und Luftqualität zu untersuchen.

#### **Geltende regulatorische Rahmenbedingungen**

Ähnlich wie in der Luftfahrt sind auch Schiffskraftstoffe von der Energiesteuer befreit, was derzeit einer Subventionierung fossiler Kraftstoffe gleichkommt [Burger und Bretschneider 2021]. Die EU-Kommission möchte daher die Richtlinie für die Energiebesteuerung überarbeiten. Die Einnahmen aus der Energiesteuer sollen zukünftig zur Förderung alternativer Kraftstoffe verwendet werden [EC 2021a]. Darüber hinaus gibt es einige bereits bestehende Mechanismen, die die Markteinführung von synthetischen Kraftstoffen im Schiffsverkehr befördern, bzw. zur Emissionsreduktion beitragen oder in modifizierter Form genutzt werden könnten:

- Die International Maritime Organization (IMO) hat eigene Emissionsziele gesetzt: bis 2050 sollen im Vergleich zu 2008 THG-Emissionsreduktionen von 50 % im internationalen Schiffsverkehr erreicht werden. Weiterhin ist die Reduktion der Kohlenstoffintensität um 40 % bis 2030 und um 70 % bis 2045 jeweils im Vergleich zu 2008 geplant. Um diese zu erreichen, hat sie einige Instrumente in Kraft gesetzt [IMO 2019]:
  - Ab 2023 wird mittels des Carbon Intensity Indicator (CII) die Betriebseffizienz in Gramm CO<sub>2</sub> pro Frachtkapazität und Seemeile gemessen.
  - Ein Ship Energy Efficiency Management Plan (SEEMP) soll die Schiffseigner dabei unterstützen, den CII für jedes Schiff zu erreichen.
  - Ebenfalls beginnend 2023 wird die technische Effizienz von Bestandsschiffen mit dem Energy Efficiency Existing Ship Index (EEXI) bestimmt.
  - Der Energy Efficiency Design Index (EEDI) wiederum benennt Emissionsreduktionsregeln für neue Schiffe. Danach sollen Schiffe, die 2022 und später gebaut werden, 50 % effizienter sein als im Vergleichsjahr 2013.
- Zusätzlich hat die IMO Regulierungen für weitere Schadstoffe erlassen:
  - Die Ausweisung von Emission control areas (ECAs) dient bspw. dazu, den Schwefelgehalt von Kraftstoffen zu begrenzen, beschränkt sich jedoch auf eben jene festgesetzten Zonen. Daher gilt seit 2020 weltweit flächendeckend ein stark reduzierter Grenzwert für den Schwefelgehalt im verbrannten Kraftstoff von max. 0.5 % statt zuvor 3.5 % (innerhalb der ECAs gilt ein Grenzwert von 0.1 %).
  - Im Internationalen Übereinkommen zur Verhütung der Meeresverschmutzung durch Schiffe (MARPOL) begrenzt Annex VI den Ausstoß luftverschmutzender Stoffe wie NO<sub>x</sub>, verbietet die Freisetzung ozonabbauender Substanzen und reguliert VOCs von Tankern.
- Die EU-MRV-Verordnung (Monitoring, Reporting, Verification) setzt eine Berichtspflicht über den Kraftstoffverbrauch in europäischen Gewässern fest. Dies soll laut Vorschlag der EU-Kommission im Rahmen des „fit-for-55“ Pakets zukünftig genutzt werden, um die Schifffahrt in das ETS einzubinden.

### **Resultierende Anforderungen für die Markteinführung**

Im Bereich der Schifffahrt ist darüber hinaus weiterer Handlungsbedarf, vor allem im Hinblick auf

- die bereitzustellenden Mengen,
- die Kraftstoffpreise und deren Auswirkungen auf den globalen Handel
- Lösungen für Bestandsschiffe
- den Ausbau der globalen Infrastrukturen für die Schifffahrt und somit
- generell die Rolle internationaler Regelungen und Organisationen

vorhanden, wenn fossile Kraftstoffe in der Schifffahrt flächendeckend ersetzt werden sollen. Der IPCC fordert bspw., die Reedereien für die Emissionen verantwortlich zu machen und CO<sub>2</sub> Emissionen konsequenter zu besteuern und zu bepreisen [IPCC 2022, S. 73].

Bei der Finanzierung der Umstellung auf synthetische Kraftstoffe im Schiffsverkehr sind nicht nur **globale Wirtschaftsstrukturen** und deren Auswirkungen auf die Kostensituation der Reedereien zu bedenken, sondern auch, dass Kostensteigerungen im Schiffsverkehr erhebliche **Auswirkungen auf Produktpreise** haben können. Die Binnenschifffahrt spielt für den Güterverkehr mit einem Anteil von ca. 6 % eine vergleichsweise geringe Rolle [UBA 2022c]. Bei inländisch produzierten Waren ist daher lediglich mit geringen Preissteigerungen zu rechnen. Allerdings macht der Schiffsverkehr 90 % des grenzüberschreitenden Warenverkehrs aus. Ein deutlicher Anstieg der Fortbewegungskosten im internationalen Schiffsverkehr würde demnach zu einem ebenfalls deutlichen Preisanstieg bei importierten Waren führen [ICS 2021]. Aufgrund der komplexen und stark globalisierten Prozessketten, hätte dies einen Einfluss auf die Preise zahlreicher Produkte und somit auch potenziell auf die Versorgungssituation der Menschen. Dies ist frühzeitig in Überlegungen zur Finanzierung einzubeziehen, um mögliche Auswirkungen sozial abfangen zu können – auch in einer **globalen Perspektive**.

Neben der Förderung der Produktion und Nutzung synthetischer Kraftstoffe muss darüber hinaus **Infrastruktur für die Verteilung, Bunkerung und Betankung** aufgebaut werden. Das BMWK fördert hier bereits den Neubau von Betankungsschiffen [BMWK 2021]. Je nach Kraftstoffart sind Umrüstungen von Schiffen oder auch Neubauten erforderlich, da insbesondere Ammoniak und Methanol spezielle Anforderungen an den Schiffsaufbau stellen. Denkbar wäre die Förderung von Umrüstungen oder von Neubauten mit alternativen Antrieben oder die Einführung einer Quote für Schiffsneubauten mit alternativen Antrieben. Dabei ist auch die lange Lebensdauer von Schiffen von über 20 Jahren mitzudenken, da hierdurch hohe Pfadabhängigkeiten bestehen. Wichtig ist daher, nach **Lösungen für Bestandsschiffe** zu suchen, bspw. durch Umrüstungen, kompatible Kraftstoffe oder Verbesserung der Effizienz, z.B. durch „low steaming“. Eine Herausforderung stellt die **globalisierte Logistik** dar, da bspw. Betankungsmöglichkeiten für Frachtschiffe entweder global verfügbar oder Schiffe mit „Dual-Fuel-Motoren“ (zweifach betankbar) ausgestattet sein müssen. Auch etwaige Wechselwirkungen der Einführung synthetischer Kraftstoffe sind zu bedenken, z.B. dass sich möglicherweise durch den Import der Kraftstoffe der Frachtverkehr erhöhen könnte<sup>43</sup>.

Vor diesem Hintergrund sowie angesichts der Tatsache, dass keiner der Kraftstoffe (bzw. auch keine andere Antriebstechnologie) ein Emissionsreduktionspotenzial von 100 % aufweist, sind auch hier **Maßnahmen zur Reduktion von Verkehr** in Erwägung zu ziehen – bspw. durch Regionalisierung von Wertschöpfungsketten. Hilfreich wären auch **Regulierungen des Finanzsektors**, die bspw. nur noch Investitionen in nachhaltigeren Schiffsverkehr erlauben. In diese Richtung gehen z. B. die Poseidon Principles<sup>44</sup>, welche in Anlehnung an die Ziele der IMO die Klimawirkung von Schiffsportfolios von Finanzinstitutionen erfassen.

### 9.4.3 **Bodengebundener Verkehr**

Der Straßenverkehr, welcher große Teile des bodengebundenen Verkehrs ausmacht, kann zu großen Teilen durch effiziente Elektroantriebe und Brennstoffzellen-Fahrzeuge defossilisiert werden (vgl. hierzu Tabelle 3-17). Dies gilt umso mehr, weil der Autobestand tendenziell

<sup>43</sup> Bei den genannten Punkten handelt es sich um Ergebnisse eines Workshops zu Markteinführungsmechanismen im Schiffsverkehr, der gemeinsam mit den Verbundprojekten und der Begleitforschung im Mai 2022 abgehalten wurde.

<sup>44</sup> Vgl. [www.poseidonprinciples.org](http://www.poseidonprinciples.org).

schneller erneuert wird als der Bestand an Schiffen oder Flugzeugen, und da mit einer mengenmäßig signifikanten Verfügbarkeit von synthetischen Kraftstoffen eher ab den 2030er Jahren zu rechnen ist (vgl. Abschnitt 9.2.4). Daher erscheint eine schnelle Elektrifizierung des bodengebundenen Verkehrs, und damit einhergehend eine Reduktion des fossil betriebenen Bestands, umso wichtiger, um die dann verfügbaren Mengen dort nutzen zu können, wo die Defossilisierung weitaus schwieriger ist. Die politische Förderung der Alternativen im Straßen- bzw. bodengebundenen Verkehr ist daher vor dem Hintergrund ihres Beitrags zu gesellschaftlichen Nachhaltigkeitszielen und planetarer Grenzen abzuwägen.

Eine weitere Handlungsoption ist zudem die Abkehr vom Individualverkehr und die Förderung einer umfassenden Mobilitätswende (z. B. Modal Shift, geteilte Mobilität, Radverkehr, etc.), welche jedoch keinen Forschungsgegenstand von BEniVer darstellt. Als systemischer Kontext ist diese aber dennoch für die Empfehlungen zur Markteinführung relevant, da die Wirkungen der Regulatorik entsprechend zu reflektieren sind.

### **Geltende regulatorische Rahmenbedingungen bzw. laufende Gesetzgebungsverfahren**

Neben den vielfältigen Rahmenbedingungen im bodengebundenen Verkehr generell sowie im Straßenverkehr im Besonderen, auf die hier nicht im Einzelnen eingegangen werden kann, (vgl. Kapitel 6) wurden auf EU-Ebene bereits weitreichende Entscheidungen im Hinblick auf einen Ausstieg aus dem Verbrennungsmotor getroffen. Die EU-Gesetzgebenden haben sich am 27.10.2022 auf eine Vereinbarung geeinigt, die vorsieht, dass alle in der EU verkauften Neuwagen und Kleintransporter bis 2035 emissionsfrei sein müssen. Im nicht verbindlichen Teil der Gesetzgebung, den sogenannten Erwägungsgründen, wird die Europäische Kommission aufgefordert, einen Vorschlag zu unterbreiten, um Fahrzeuge, die „ausschließlich mit CO<sub>2</sub>-neutralen Kraftstoffen betrieben werden“, auch über das Jahr 2035 hinaus zuzulassen. Diese Regelung soll als Ausnahmeregelung „außerhalb des Geltungsbereichs der Flottenstandards“ zur Anwendung kommen, was jedoch bislang noch nicht weiter spezifiziert wurde. Die Gesetzgebenden haben sich zusätzlich auf das Zwischenziel geeinigt, wonach die CO<sub>2</sub>-Emissionen bis 2030, gegenüber dem Stand von 2021, bei Pkw um 55 % und bei Lieferwagen um 50 % gesenkt werden sollen. Weiterhin sieht die Vereinbarung auch eine neue Methodik für die Berichterstattung über die sogenannten Lebenszyklus-Emissionen von Fahrzeugen vor, die die Kommission bis 2025 vorlegen wird [Packroff und Carroll 2022]. Die Europäische Kommission setzt im Straßenverkehr somit auf Elektromobilität und möchte die Bestrebungen für synthetische Kraftstoffe auf die Luft- und Schifffahrt konzentrieren.

### **Resultierende Konsequenzen für die Markteinführung**

Die vorliegenden Szenarien-Ergebnisse (vgl. Kapitel 6) verweisen darauf, dass im Straßenverkehr ein signifikanter Bedarf an synthetischen Kraftstoffen voraussichtlich erst Ende der 2030er Jahre besteht – lediglich im PtL-Szenario tritt dieser früher auf, wohingegen bis 2030 bereits massive CO<sub>2</sub>-Einsparungen umgesetzt sein sollen.

Der Handlungsbedarf im Bereich des bodengebundenen Verkehrs ist daher stark auf die grundsätzliche Ermöglichung der Klimaneutralität fokussiert.

Vor dem Hintergrund eines im Vergleich zum Elektroantrieb wesentlich höheren Primärenergiebedarfs (vgl. z.B. [Ueckerdt et al. 2021b; Göckeler et al. 2020]), einer auch langfristig deutlich schlechteren THG-Bilanz (vgl. Kapitel 4.5, sowie [Ueckerdt et al. 2021b; Wietschel et al. 2022; Jöhrens et al. 2022]), höherer Betriebs- und Systemkosten [Wietschel et al. 2022; Göckeler et al. 2020; Basma et al. 2021; Burchardt et al. 2021; Jöhrens et al. 2022; Mottschall et al. 2019] sowie begrenzter natürlicher Ressourcen (z.B. Wasser und Fläche), welche insbesondere den Aufbau von Stromproduktionskapazitäten beschränken, ist eine technologiespezifische, energiepolitische Adressierung synthetischer Kraftstoffe im Pkw- und SNF-Bereich zum jetzigen Zeitpunkt nicht sinnvoll (vgl. hierzu Tabelle 4-31 und Tabelle 4-33). Der Einsatz begrenzter finanzieller Ressourcen erweist sich im Bereich des Elektroantriebs im Hinblick auf Nachhaltigkeitsziele als effektiver. Gleichzeitig werden noch zu errichtende Produktionskapazitäten in anderen Sektoren dringend benötigt. Daher sollten aus politikwissenschaftlicher Perspektive vor allem die Anstrengungen zur Förderung von Elektroantrieben in Kombination mit einer Transformation des Mobilitätssektors verstärkt werden. Ziel wäre es, die prognostizierten, auf Szenarien-Annahmen basierenden Bedarfe an synthetischen Kraftstoffen durch eine noch weitergehende Verringerung der Anzahl an Bestandsfahrzeugen bis 2045 möglichst zu minimieren. Der Anteil von Elektrofahrzeugen an den Neuzulassungen sollte rasch erhöht und der Aufbau der Ladeinfrastruktur vorangetrieben werden. Dies erscheint auch im Hinblick auf die Versorgungssituation mit synthetischen Kraftstoffen erforderlich, um ansonsten mittel- bis langfristig zu erwartende Nutzungskonkurrenzen zu vermindern. Im SNF-Bereich sollte – neben dem Aufbau von Infrastruktur und der politischen Weichenstellungen für den Antriebswechsel – ein Fokus auf die Förderung der weiteren Entwicklung von elektrischen 40t-Lkw sowie die Herausforderungen auf der Langstrecke gesetzt werden. Nur wenn zeitnah die Entwicklung dieser Fahrzeuge oder anderer Elektrifizierungsalternativen (Elektrifizierung von Straßen / Oberleitungen) nicht gelingt, braucht es langfristig eine Markteinführung synthetischer Kraftstoffe [Ueckerdt et al. 2021a].

#### **9.4.4 Zwischenfazit: Sektorenübergreifende Implikationen**

Vor dem Hintergrund eines erwartbaren sukzessiven Aufbaus von Produktionsstrukturen für synthetische Kraftstoffe zeigt sich, dass die alleinige Betrachtung eines Verkehrsbereichs keine zielführende Strategie ist. Gerade angesichts der in den Abschnitten 9.2.3 und 9.2.4 skizzierten Herausforderungen ist davon auszugehen, dass nicht alle Bedarfe der drei Bereiche des Verkehrssektors gleichzeitig in ausreichenden Mengen mit synthetischen Kraftstoffen versorgt werden können. Dementsprechend muss eine klare Hierarchisierung der Bereiche vorgenommen werden und gleichzeitig die Bedarfe der Industrie, wo ebenso nicht in allen Bereichen andere Dekarbonisierungsstrategien bestehen, bedacht werden.

Als langfristige technologische Optionen – sollte die Elektrifizierung des Straßenverkehrs und die geforderte Reduktion der THG-Emissionen nicht ausreichend schnell gelingen – können synthetische Kraftstoffe als Koppelprodukte durch Spillover-Effekte der wesentlichen Herstellungsverfahren für Kerosin bzw. von Grundstoffen für die Industrie (vgl. Abschnitt 9.4.1) und dem Schiffsverkehr (vgl. auch [Lehmann et al. 2020]) eingesetzt werden. Hier besteht jedoch weiterer Forschungsbedarf in Bezug auf die bedarfsseitige Optimierung der Prozesse zur Herstellung der synthetischen Kraftstoffe (s. Abschnitt 10.1.4.2). Der Umstieg auf den Elektroantrieb im SNF- und Pkw-Bereich ist vor dem Hintergrund knapper Mengen gleichzeitig die Voraussetzung für eine schnelle Dekarbonisierung des Schiff- und Flugverkehrs. Die Förderung

synthetischer Kraftstoffe im Straßenverkehr könnte den Umstieg auf Elektromobilität verlangsamen, da finanzielle Mittel gebunden wären und Anreize zum Umstieg auf Elektromobilität verringert würden. Auf die zukünftige hohe Mengenverfügbarkeit von synthetischen Kraftstoffen zu warten und im Straßenverkehr nicht alle politischen Kräfte in den Umstieg auf bereits existierende, günstigere, effizientere und nachhaltigere Technologieoptionen zu setzen, wäre mit hohen Risiken verbunden [Ueckerdt et al. 2021b].

## 9.5 Fazit: Resultierende energie- und gesamtsystemische Konsequenzen für die Markteinführung

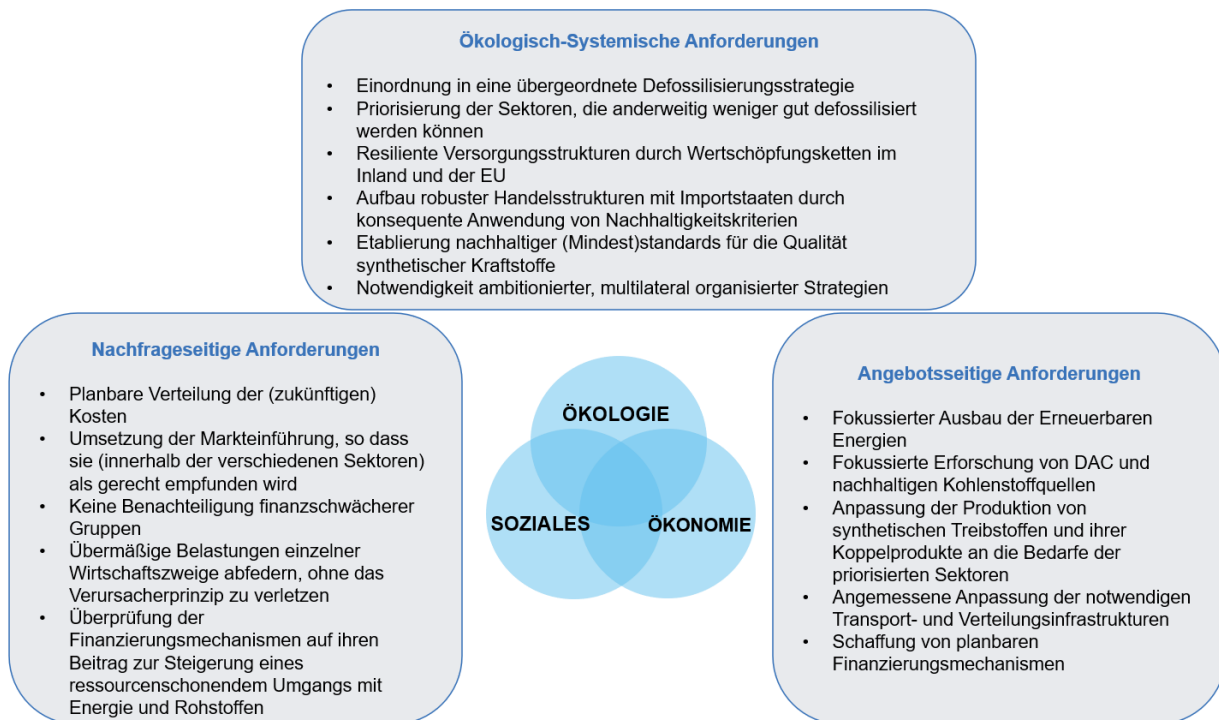
In der Summe lassen sich aus den vorherigen Ausführungen folgende Schlussfolgerungen für die Markteinführungen synthetischer Kraftstoffe ziehen:

Da die Einführung synthetischer Kraftstoffe einen Baustein der Energiewende im Verkehr darstellt, resultiert daraus, dass diese unter Beachtung gesamtgesellschaftlicher Ziele aus den Bereichen der Ökologie, der Ökonomie und dem Sozialen sowie unter Berücksichtigung weiterer grundsätzlicher politischer Anforderungen zu erfolgen hat. Dies bedeutet, dass Markteinführungsmechanismen weder Selbstzweck sind noch für sich selbst stehen können, sondern ihre Lenkungswirkung im Hinblick auf die Energiewende im Verkehr und die übergeordnete Zielstellung des SDG 13<sup>45</sup> im Zusammenspiel mit den weiteren SDGs hin zu optimieren ist. Die Notwendigkeit, den einhergehenden gesamtgesellschaftlichen Anforderungen zu genügen, bedingt daher die Entwicklung der Markteinführungsmechanismen anhand eines umfassenden Kriterienkatalogs (vgl. auch Abschnitt 3.7 zur hierfür entwickelten Bewertungsmatrix), der neben möglichen Umweltauswirkungen ebenso soziale und ökonomische Effekte in den Blick nimmt<sup>46</sup> - wie in Abbildung 9-1 dargestellt.

---

<sup>45</sup> Im Jahr 2015 hat sich die Weltgemeinschaft die 17 Ziele der Nachhaltigen Entwicklung („Sustainable Development Goals“, kurz „SDGs“) gesetzt, die sie bis zum Jahr 2030 umsetzen will, um weltweit Frieden und das Wohlergehen der Menschen und unseres Planeten als Ganzes zu sichern [UN 2022b]. Dazu zählt auch das SDG 13: „Take urgent action to combat climate change and its impacts“ [UN 2022a].

<sup>46</sup> Die in diesem Kapitel angewendete Vorgehensweise kann zusätzlich auch zur Schließung der Forschungslücke, die im Hinblick auf die Erarbeitung eines Nachhaltigkeitsrahmens für synthetische Kraftstoffe besteht [PtX Hub 2021; Bracker 2017; Heinemann und Mendelvitch 2021; Morgen et al. 2022; Wiese et al. 2022], beitragen.



**Abbildung 9-17:** Entwicklung von Markteinführungsmechanismen

Wie die vorherigen Ausführungen – und auch die Analyse in Abschnitt 9.2 – gezeigt haben, befinden wir uns in einer frühen Phase des Markthochlaufs. Grundsätzlich ist daher anzumerken, dass kurzfristige Markteinführungsmechanismen gegenwärtig eher den Fokus auf die weitere Technologieentwicklung legen sollten. Im Verlauf der Zeit und bei steigenden Mengen an produzierten Kraftstoffen wird sich der Charakter der MEM ändern und eher Finanzierungs- und Verteilungsfragen in den Blick nehmen.

Zum heutigen Zeitpunkt empfehlen sich aus energie- und gesamtsystemischer Sicht sowie für die Weiterentwicklung der Angebots- und Nachfrageseite vor allem die folgenden – eher kurzfristig umzusetzenden Weichenstellungen, die den mengenmäßigen Hochlauf begleiten und lenken sollen.

### 9.5.1 Ökologisch-systemische Aspekte

Der Fokus dieser Punkte liegt darauf, eine möglichst ressourceneffiziente und nachhaltige Einordnung in die gesamte Energiewende im Verkehr zu erreichen. Das umfasst die folgenden Empfehlungen:

#### Einordnung in eine übergeordnete Defossilisierungsstrategie

Die Einführung synthetischer Kraftstoffe sollte in eine übergeordnete Defossilisierungsstrategie des Verkehrssektors eingebettet sein. Diese sollte, unter Beachtung von gesamtsystemischer Effizienz und von Nachhaltigkeitskriterien, einen angemessenen Mix aus Elektrifizierung und Kraftstoffen für den gesamten Verkehrssektor schaffen und eine intelligente Verzahnung mit



Maßnahmen zur Verkehrsverlagerung und –vermeidung anstreben, um die Lücke zwischen Bedarf an Kraftstoffen und verfügbaren Mengen weiter zu schließen.

- Die Markteinführung muss mit dem übergeordneten Rahmen der EiV / den sektoralen und jährlichen Klimaschutzzielen kohärent sein.
- Bei der Markteinführung muss ausreichend Spielraum bleiben für weitere technologische Entwicklungen.
- Die zu treffenden Maßnahmen sind regelmäßig wissenschaftlich / auf ihre Effektivität hin zu prüfen.

### **Priorisierung der Sektoren, die anderweitig weniger gut defossilisiert werden können**

Sofern die Deckung größerer Teile des Bedarfs im Verkehrssektor mit synthetischen Kraftstoffen erst ab der Mitte der 2030er-Jahre erfolgen kann, ist es wichtig, die Markteinführung auf die Sektoren zu lenken, in denen aus heutiger Sicht kaum bis eher wenige Alternativen zu den diversen synthetischen Kraftstoffen bestehen. Dazu gehört der Industriesektor mit einer dortigen stofflichen Nutzung oder einer Nutzung für Hochtemperaturprozesswärme und im Verkehrsbereich v. a. die Luftfahrt, in der insbesondere für Mittel- und Langstreckenflüge Wasserstoff oder synthetische Kraftstoffe zur Defossilisierung notwendig sein werden.

- Zuerst sollte die Deckung der Bedarfe der Bereiche Industrie und Luftfahrt (insb. Langstrecke) und der Schifffahrt gewährleistet werden.

### **Resiliente Versorgungsstrukturen durch Wertschöpfungsketten im Inland und der EU**

Im Zuge des russischen Angriffskrieges auf die Ukraine wurde besonders deutlich, wie die Rohstoffabhängigkeit von einzelnen Staaten im Konfliktfall zum Problem werden kann. Im Juli 2022 war Russland immer noch der wichtigste Rohöllieferant für Deutschland [BAFA 2022]. Neben der Verlagerung von Nachfrage auf Anwendungsbereiche, die nicht von Öl abhängig sind, bietet eine Substitution von fossilem Rohöl durch synthetische Kraftstoffe und Elektrifizierung die Chance, die Abhängigkeit von Importen zu reduzieren und geopolitische Machtverhältnisse zu verändern.

Um bei der Versorgung mit erneuerbaren Kraftstoffen eine möglichst große Robustheit gegenüber externen Schocks zu erreichen und eine möglichst gute Bewältigungskapazität für den Umgang mit Krisen zu schaffen (Stichwort Resilienz), ist es wichtig, die Auswahl der Lieferländer, bzw. der Produktionsstandorte, von Anfang an auf Nachhaltigkeitskriterien (z.B. SDGs, geplanter delegated Act für Wasserstoff der EU) zu stützen.

- Ein Mittel hierfür ist die Etablierung regionaler Wertschöpfungsketten, bspw. mit Produktionsstandorten innerhalb der EU. Dies kann nicht nur die Importabhängigkeit reduzieren und in Krisenfällen die Resilienz verbessern, sondern auch die demokratische Kontrolle von Nachhaltigkeitsstandards durch die Institutionen der EU ermöglichen. Darüber hinaus kann eine Regionalisierung von Wertschöpfungsketten Transportbedarfe reduzieren und somit einen Beitrag zu einer Verringerung des Kraftstoffbedarfs sowie einer Verringerung transportbedingter Emissionen leisten.

- Es werden auch Mechanismen für die inländische Herstellung von Kraftstoffen benötigt. Potenzielle erste Andockpunkte könnten Regionen mit hohen Abrechnungsmengen erneuerbaren Stroms oder hohen Bedarfen an synthetischen Kraftstoffen sein, ohne dass dadurch ein zukünftiger Netzausbau unterbunden wird.

### **Aufbau robuster Handelsstrukturen mit Importstaaten durch konsequente Anwendung von Nachhaltigkeitskriterien**

Derzeit gehen wissenschaftliche Studien in der Regel davon aus, dass mindestens ein Teil der benötigten, strombasierten Kraftstoffe importiert werden wird (vgl. Kapitel 6.8.3.3)<sup>47</sup>. Dass die Wertschöpfungskette für diese erst aufgebaut werden muss, bietet die Chance, transparente Standards für Lieferketten (vgl. die hierfür relevante deutsche und europäische Gesetzgebung: Lieferkettensorgfaltspflichtengesetz sowie EU-Taxonomie, ggf. EU-Due-Diligence-Richtlinie) von Anfang an so zu gestalten, dass sie auch unter veränderten Rahmenbedingungen funktionieren. International beinhaltet dies auch den Aufbau fairer Lieferketten für synthetische Kraftstoffe. Hier ist zu beachten, dass es global betrachtet sehr unterschiedliche soziale, ökologische und ökonomische Ausgangslagen gibt.

Um diese neu aufzubauenden Lieferketten wirklich nachhaltig und damit auch langfristig stabil für die exportierenden und für die importierenden Länder zu gestalten, bieten insbesondere die folgenden SDGs wichtige Orientierungshilfen:

- Eine Voraussetzung für die Erreichung von Nachhaltigkeitszielen ist es, ökonomische und soziale Unterschiede zu reduzieren – entsprechend dem SDG 10 (reducing inequalities among countries). Dies bedeutet auch, Umweltschäden, Emissionen, Ressourcen- und Flächenverbrauch nicht einfach in die Lieferländer zu verlagern, sondern das Interesse der dort lebenden Menschen als gleichwertig zu betrachten und ökologische Effekte einzubeziehen.
- Ein wichtiger Aspekt ist dabei das Einbeziehen von Wassergerechtigkeit in Bezug auf den Wasserverbrauch der Wasserstoffproduktion – entsprechend SDG 6 (ensure availability and sustainable management of water and sanitation for all) - sowie in Bezug auf die Stromproduktion das Einbeziehen von Flächennutzung, Landnutzungsrechten und Konflikten darüber – entsprechend SDG 15 (Life on Land).
- Gleichzeitig sollten auch die Strategien für die Transformation der Energiesysteme vor Ort beachtet werden: Durch die Nutzung erneuerbaren Stroms vor Ort können mit denselben finanziellen Mitteln mehr Emissionen eingespart werden, als im Falle einer Umwandlung in synthetische Kraftstoffe. Nicht nur die Kosten- sondern auch die Ressourceneffizienz (z.B. Flächennutzung, Rohstoffe) ist für die Umwandlung in synthetische Kraftstoffe geringer als für die direkte Stromnutzung; mit demselben Ressourcenaufwand werden weniger THG-Emissionen eingespart. Vor dem Hintergrund knapper Ressourcen und finanzieller Mittel ist daher eine Produktion strombasierter Kraftstoffe für den Export mit der Transformation des Stromsektors vor Ort abzuwägen – entsprechend SDG 7 (ensure access to affordable, reliable, sustainable and modern energy for all) sowie SDG 12 (sustainable patterns of consumption and production).

<sup>47</sup> Vgl. beispielhaft für eine Übersicht anderer Studien: [Matschoss et al. 2020, S. 38]

- An Produktionsorten mit niedrigem Defossilierungsgrad der Stromversorgung kann eine „doppelte Zusätzlichkeit“ sinnvoll sein, in dem Sinne, dass der zusätzliche Ausbau erneuerbarer Stromproduktionskapazität über den Bedarf für die Produktion synthetischer Kraftstoffe hinausgeht. Damit kann gleichzeitig ein Beitrag zum Ausbau der Versorgung mit erneuerbaren Energien vor Ort geleistet werden und eine verlangsamte Defossilisierung der Stromversorgung vermieden werden.
- Die Produktion strombasierter Kraftstoffe sollte entsprechend SDG 8 eine lokale Wertschöpfung und gute Arbeitsplätze vor Ort generieren sowie insgesamt einen Beitrag zur nachhaltigen Entwicklung leisten [PtX Hub 2021]. Es sollten auch mögliche volkswirtschaftliche Effekte auf andere Sektoren mitbedacht werden, die sich bspw. durch Währungseffekte infolge eines Exports strombasierter Kraftstoffe ergeben können (Stichwort resource curse oder poverty paradox).
- Der Aufbau dieser Handelsstrukturen erfolgt im Kontext der historischen Verantwortung des globalen Nordens: Die Nutzung von Flächen im globalen Süden für die Energieproduktion Europas ist aus postkolonialer Perspektive – und vor dem Hintergrund der auf der COP 27 in Sharm-EL Sheikh Ende 2022 geführten Diskussion zur Entschädigung von ‚losses and damages‘ - nicht unproblematisch [Universität Hamburg 2021]. Die Erkenntnis dieser Tatsache macht eine kritische wissenschaftliche Begleitung der Beschaffungsstrategien erforderlich.
- Gleichzeitig besteht gerade für Länder des globalen Südens die Chance, globale Machtverhältnisse und Handelsabhängigkeiten zu verschieben und als Produktions- und Lieferländer erneuerbarer Energien die eigene ökonomische Stellung zu verbessern, Fachwissen zu generieren und zu binden sowie die technischen Strukturen (bspw. mit EE-Produktionsanlagen oder Spezialkräften) für die eigene Stromversorgung zu nutzen [IRENA 2022a]. Mit dem Ziel des Aufbaus einer resilienten Infrastruktur und nachhaltigen, inklusiven Industrialisierung vor Ort (SDG 9), müssen Produktionsanlagen in die Energie – und Wirtschaftssysteme von Produktionsländern eingebunden werden.
- Zusätzlich stellt sich das Problem, dass die meisten Länder aufgrund fehlender eigener Kapazitäten derzeit gezwungen sind, EE-Produktionsanlagen oder deren Bestandteile aus wenigen Lieferländern zu importieren – diese Abhängigkeit zu verringern ist eine industriepolitische Herausforderung. Die IRENA [IRENA 2022a] geht davon aus, dass es durch die sich im Aufbau befindende Wasserstoffwirtschaft zu erheblichen geoökonomischen Verschiebungen kommt, bei gleichzeitiger Diversifizierung der energieexportierenden Länder. Während potenziell jedes Land in der Lage ist, erneuerbare Energien zu produzieren, leben derzeit 80 % der Weltbevölkerung in Ländern, die fossile Energie importieren. Derzeitige Netto-Importeure, wie bspw. Chile, könnten zu Netto-Exporteuren werden und gleichzeitig nachhaltige Geschäftsmodelle sowie den fossilen Phase-out im eigenen Land voranbringen.

### **Etablierung nachhaltiger (Mindest)standards für die Qualität synthetischer Kraftstoffe**

Um den Beitrag der Transformation fossiler Handelsstrukturen zur nachhaltigen Entwicklung zu gewährleisten, wäre insgesamt die Etablierung international gültiger Standards für synthetische Kraftstoffe sinnvoll, da es sonst zu Handelsbarrieren und Marktfragmentierung kommen kann, bzw. negative Klima-, Umwelt- oder soziale Folgen möglich sind [IRENA 2022a, S. 74].

Nicht nur, aber besonders im Falle des Imports, ist es sinnvoll, einen Nachhaltigkeitsrahmen zur Zertifizierung synthetischer Kraftstoffe politisch festzulegen, um negative Effekte soweit wie möglich zu reduzieren.

- Die Europäische Kommission plant, hierfür „ein europäisches Zertifizierungssystem“ für synthetische Kraftstoffe zu entwickeln, „das sich insbesondere auf die während des gesamten Lebenszyklus eingesparten Treibhausgasemissionen und auf Nachhaltigkeitskriterien stützt“ [EC 2020]. Der Markthochlauf sollte auf einer solchen Zertifizierung fußen, um Zielkonflikte zu vermeiden (bspw. höhere THG-Emissionen als im Status Quo).

### **Notwendigkeit ambitionierter, multilateral organisierter Strategien**

Gerade im Bereich der Entwicklung weltweiter, zumindest aber möglichst weitreichender Standards, die auch zur Vermeidung von Ausweichstrategien (Tankering oder Bunkering) beitragen können, ist es hilfreich, die Kooperation mit anderen Staaten zu suchen. Dabei ist es wichtig – auch vor dem Hintergrund der Ergebnisse der COP 27, die zur Anerkennung der globalen Verantwortung der kumulierten Emissionen (d.h. Staaten mit hohen historischen bzw. heutigen Emissionen) führte – ambitionierte Ziele zu verfolgen und eine Koalition aus möglichst vielen Staaten zu bilden.

- Die Markteinführung sollte nicht rein national, sondern bevorzugt auf der Ebene der EU oder der OECD erarbeitet bzw. umgesetzt werden, um zur weltweiten Umsetzung gleicher (ambitionierter) Standards beizutragen. Ggf. könnte dies auch zur Vermeidung von ‚Umgehungsstrategien‘ (Bunkering/ Tankering) beitragen.
- Dabei dürfen die zu entwickelnden Maßnahmen in diesem frühen Stadium der Marktentwicklung durchaus ambitioniert sein. Da sicherlich mehrere Staaten versuchen, hier die Technologieführerschaft zu erreichen, sollten sie nicht wegen möglicher Befürchtungen um ein mögliches ‚carbon leakage‘ klein gehalten werden.
- Ein starker multilateraler Ansatz, der weltweit auf einer Koalition möglichst vieler Länder beruht, könnte nicht nur vorteilhaft für den Klimaschutz sein. Dies kann auch gleichzeitig zur Diversifizierung möglicher Lieferländer beitragen. Dies reduziert die Abhängigkeit von einem bzw. wenigen Lieferländern und trägt gleichzeitig zum Aufbau nachhaltiger Energieversorgungssysteme in vielen Ländern weltweit bei.

### **9.5.2 Angebotsseite**

Auf der Angebotsseite stellen sich Fragen nach den notwendigen Infrastrukturen entlang der Wertschöpfungskette, inkl. der benötigten Menge an Strom aus erneuerbaren Energien, den zu wählenden Prozessrouten, den damit einhergehenden Koppelprodukten und deren Nutzung.

#### **Fokussierter Ausbau der erneuerbaren Energien als wesentliche Grundlage**

In jedem Fall ist als unabdingbare Voraussetzung für den Markthochlauf von synthetischen Kraftstoffen ein massiver Ausbau von Produktionskapazitäten erneuerbarer Energien, sowohl im Inland als auch im Ausland, erforderlich.

- Im Inland sollten die ergriffenen Maßnahmen zur Beschleunigung des EE-Ausbaus weiterverfolgt und ggf. verstärkt werden.
- Gemäß der entwickelten Ländertypologie sollten in der Folge für die jeweiligen Ländertypen angemessene Markteinführungs- bzw. Kooperationsmechanismen erarbeitet werden, deren erster Fokus die Ermöglichung der Deckung der eigenen Bedarfe mit erneuerbaren Energieträgern bzw. daraus gewonnenen Folgeprodukten sein sollte. Somit gehören auch Energiepartnerschaften bzgl. des EE-Ausbaus und der Stärkung lokaler nachhaltiger Energieversorgungsstrukturen zu den unverzichtbaren Grundlagen des weltweiten Klimaschutzes und dem folgenden Aufbau eines weltweiten Handels mit synthetischen Kraftstoffen, womit mehrfache Resilienzen gefördert werden können.
- Darauf aufbauend 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 H<sub>2</sub>-readiness und eine deklarierte Exportorientierung aufweisen, umgesetzt und weiter ausdifferenziert bzw. verfeinert werden.

#### **Fokussierte Erforschung von DAC und nachhaltigen Kohlenstoffquellen**

Neben dem Aufbau von erneuerbarer Stromproduktion, Elektrolyse- und Synthesekapazitäten wird in zahlreichen Studien bzw. Szenarien die Bedeutung des Hochlaufs der DAC-Technologie hervorgehoben [Ueckerdt et al. 2021a]. Durch die direkte Bindung von CO<sub>2</sub> aus der umgebenden Atmosphäre dient DAC als CO<sub>2</sub>-Quelle für synthetische Kraftstoffe und ermöglicht somit die Schließung des Kohlenstoffkreislaufs. Sie ist somit zur Erreichung der Klimaziele von herausragender Bedeutung.

- Die weitere Entwicklung der DAC sollte ebenso im Fokus von Fördermaßnahmen stehen, da sich diese Technologie noch in einem frühen Entwicklungsstadium befindet und nicht zum Nadelöhr für die Produktion synthetischer Kraftstoffe werden sollte.
- Die Erschließung weiterer Kohlenstoffquellen (z.B. industrielle Abgasströme) sollte mittel- und langfristig auf die Bereiche beschränkt werden, die nach heutigem Wissensstand nicht komplett dekarbonisierbar sind (was stetig zu überprüfen ist), damit keine neuen CO<sub>2</sub>-intensiven Pfadabhängigkeiten entstehen.

### **Anpassung der Produktion von synthetischen Kraftstoffen und ihrer Koppelprodukte an die Bedarfe der priorisierten Verkehrsbereiche**

Je nach gewählter (bzw. der Verfügbarkeit und Skalierbarkeit der) Prozessroute (Fischer-Tropsch oder Methanol) ergeben sich auch Koppelprodukte, die in anderen Sektoren einsetzbar sind, wie dies aktuell bei der Fischer-Tropsch-Synthese der Fall ist. Wichtig ist es daher zu untersuchen (bzw. die Forschung voranzutreiben), in welchen Mengenverhältnissen die jeweiligen Kraftstoffe, insbesondere synthetisches Kerosin, herstellbar sind und welche Angebots- und Nachfragerelationen sich für die Koppelprodukte ergeben. Die Untersuchung der Allokation von synthetischen Kraftstoffen auf die verschiedenen Energie- und Verkehrsbereiche kann dazu beitragen, die Mengenverhältnisse so einzustellen, dass einerseits ein langfristiger Absatz gesichert ist und andererseits keine parallelen strukturkonservierenden Maßnahmen ergriffen werden.

- Da insbesondere für den Langstreckenflugverkehr (zumindest nach heutigem Kenntnisstand) keine Alternativen zum Kerosin bestehen, sollten die Produktionsprozesse auf den Output von Kerosin hin optimiert werden und mit einer gesamt-systemisch sinnvollen Nutzung möglicher Koppelprodukte einhergehen.
- Im bodengebundenen Verkehr sollte die Nutzung der angesprochenen Koppelprodukte als Drop-In-Kraftstoffe für den Bestand und für die Spezialfahrzeuge, die nur schwer elektrifiziert werden können, begrenzt werden.
- Aus heutiger Sicht erscheint die Fischer-Tropsch-Synthese als technisch fortgeschrittener, wenngleich die Syntheseprozesse eher weniger für einen fluktuierenden Betrieb geeignet sind. In Bezug auf die Zeitachse erscheint ihr Ausbau heute vorteilhafter. Wichtig wäre es, in Bezug auf diese Technik zu erforschen, inwieweit eine vorrangige Produktion v.a. von Kerosin und Naphta für die Grundstoffchemie und Schiffsdiesel dabei möglich ist und inwieweit der Prozess stärker zu flexibilisieren ist.
- Parallel dazu sollte eine weitere Erforschung bzw. Hochskalierung der Methanolsynthese und von Ammoniak als Energieträger (bzw. als „Transportmedium“) erfolgen und auch hier die Steuerung der Produktion der jeweiligen Koppelprodukte insb. für die Luftfahrt, die Industrie und den Schiffsverkehr im Fokus stehen.
- Zusätzlich gilt es, weitere Technologien – inkl. ihrer Life-Cycle-Analysis - zu erforschen, so z. B. die chemische Wasserstoffspeicherung oder die Nutzung von Zink-Elektrolyten für die Gewinnung von Wasserstoff etc.

### **Angemessene Anpassung der notwendigen Transport- und Verteilungsinfrastrukturen**

Diese Aspekte sollten bereits beim Aufbau der notwendigen Herstellungs- und Transportinfrastrukturen für synthetische Kraftstoffe berücksichtigt werden. Zu den relevanten Forschungsfragen zählt, ob (und ggf. wie) sich diese für beide Produktionsrouten (FT- und Methanolsynthese) sinnvoll miteinander vereinbaren lassen. Dies ist vor allem im Hinblick auf die jeweils notwendigen Transport- und Verteilungsinfrastrukturen des gesamten Nutzungsspektrums - inkl. der Industrie - zu beachten.

- Für die angestrebten Produktionsrouten sollte jeweils der ggf. notwendige Ausbau der Infrastrukturen (inkl. der notwendigen (De-)Zentralität und geographischen Verteilung) von vorneherein analysiert und integriert werden.
- Gleichzeitig gilt es, einen Ausbau paralleler Infrastruktursysteme zu vermeiden.

### **Schaffung von planbaren Finanzierungsmechanismen**

Zur Sicherung des Aufbaus der notwendigen Produktions- und Transportinfrastrukturen werden möglichst langfristige Finanzierungsmechanismen benötigt, die den Investierenden ausreichende Sicherheit für ihre Investitionen in einem noch mit vielen Risiken behafteten Markt bieten. Zur konkreten und sachdienlichen Umsetzung umfassender Finanzierungsmechanismen bei einer beginnenden Serienreife bzw. großskaligen Produktion ist es wichtig, detailliertere Informationen zur Kostenstruktur der einzelnen Kraftstoffe zu erwerben.

- Hierfür bieten sich in den frühen Phasen des Markthochlaufs Mechanismen an, in denen der Staat bzw. staatliche Institutionen als Nachfragende synthetischer Kraftstoffe auftreten - entweder für den eigenen Verbrauch oder für andere Verbrauchende, um somit Investitionen anzureizen bzw. eine langfristige Abnahme zu sichern. Dies kann über die Finanzierung in Form von Pilotanlagen/ Hubs/ regionalen Polen umgesetzt werden, die auch eine konzertierte Weiterentwicklung der Technologien und der relevanten systemischen Fragestellungen erlauben.
- Eine weitere Option können Innovationssausschreibungen für die Herstellung von synthetischen Kraftstoffen sein, die ebenso mit langfristigen Abnahmegarantien verbunden sind. Dabei kann aus den Erfahrungen des Inflation Reduction Acts in den USA oder des H2Global-Mechanismus gelernt werden.
- Beide Mechanismen (Piloten und Investitionsausschreibungen) sollten als „lernende Systeme“ konzipiert sein, die neue Entwicklungen aufnehmen können und durch die Beachtung von Nachhaltigkeitskriterien das Auftreten von „stranded investments“ vermeiden.
- Perspektivisch bieten sich, wenn mehr Erfahrungen bzgl. der Kostenstruktur der einzelnen Kraftstoffe bestehen, mehrere Mechanismen zur Finanzierung von Investitionen und zur Verteilung der Kosten an.
- Dazu gehören Finanzierungsmechanismen in Form von
  - diversen ordnungspolitischen Vorgaben/ Grenzwerten (auch LCA-basiert)
  - verpflichtenden Quoten mit justierten Pönalen bei Nichterfüllung,
  - einer Selbstverpflichtung des Staates, seine eigenen Flotten damit zu betreiben,
  - einer Steuer/ einem Preis auf CO<sub>2</sub>-Emissionen als Querschnittsinstrument,
  - langfristigen Abnahmeverträgen als Festvergütung oder ‚contracts for difference‘
  - und dem damit kohärenten Abbau der Subventionen für fossile Kraftstoffe.

### **9.5.3 Nachfrageseite**

Zum heutigen Zeitpunkt spielen Finanzierungsfragen für die Produktion von synthetischen Kraftstoffen aufgrund der noch sehr geringen Mengen nur eine untergeordnete Rolle, weswegen sich in dieser Anfangsphase tendenziell auch eher steuerbasierte Mechanismen anbieten, da es gegenwärtig vor allem der Staat ist, der diese Märkte und auch die Nachfrage schaffen kann<sup>48</sup>. Sobald sich diese Marktstrukturen etabliert haben und nennenswerte Mengen an Kraftstoffen produziert und nachgefragt werden, können weitere Finanzierungsmechanismen umgesetzt werden. Dabei sind jedoch Prinzipien der Nachhaltigkeitspolitik (z.B. Verursacher- und Verantwortungsprinzip) zu beachten, was zu unterschiedlichen Finanzierungslösungen in den verschiedenen Sektoren führen kann.

- Eine möglichst planbare Verteilung der (zukünftigen) Kosten, die es allen gesellschaftlichen Schichten und Akteuren erlaubt, mögliche Alternativen auf- und auszubauen, ist eine wesentliche Grundlage einer gelingenden Energiewende im Verkehr.
- Die Markteinführung sollte so umgesetzt werden, dass sie (innerhalb der verschiedenen Sektoren) als gerecht empfunden wird.
- Eine Benachteiligung finanzschwächerer Gruppen ist zu vermeiden.
- Übermäßige Belastungen einzelner Wirtschaftszweige sollten abgefedert werden, ohne jedoch das Verursacherprinzip dabei zu verletzen.
- Gleichzeitig sind die entsprechenden Finanzierungsmechanismen auch auf ihren Beitrag zur Steigerung eines ressourcenschonenden Umgangs mit Energie und Rohstoffen hin zu überprüfen.

### **9.5.4 Vorschlag einer zeitlichen Staffelung möglicher Markteinführungsmechanismen**

Werden die geschilderten Beobachtungen zu den theoretischen Überlegungen der Analyse technologischer Innovationssysteme in Bezug gesetzt (vgl. Abschnitt 9.1.2), zeigt sich, dass sich der Markt für synthetische Kraftstoffe im Übergang zur Entwicklungsphase befindet und in jeder Hinsicht mit zahlreichen Unsicherheiten behaftet ist. Perspektivisch ist ein Andauern dieser Phase bis in die 2030er Jahre nicht abwegig. Selbst bei gezielter Forcierung der Marktentwicklung erscheint es derzeit fraglich, ob eine ‚Take-off-Phase‘ vor 2030 erreicht werden kann.

Um die Marktentwicklung dahingehend zu beschleunigen, gilt es zunächst, die Forschungsaktivitäten zu verstärken, um den Erkenntnisgewinn zu beschleunigen und ebenso die Verbreitung des generierten Wissens. Diese Prozesse lassen sich vorantreiben, in dem durch diverse Anreize oder Regularien weitere potenzielle Marktteilnehmer für das TIS gewonnen werden, was die Ressourcenbasis im TIS stärkt [Hekkert et al. 2011, S. 11]. Praktisch bedeutet dies, insbesondere kurzfristig einen Schwerpunkt der Markteinführungsmechanismen auf die För-

---

<sup>48</sup> Vgl. auch [Kattel et al. 2018, S. 20] zu ‚mission oriented public investments‘.



derung von Forschung und Entwicklung zu legen, damit offene Fragen beim Einsatz synthetischer Kraftstoffe geklärt und die Einsatzfähigkeit der Technologien am Markt möglichst rasch erreicht werden kann.

Da der Bedarf an erneuerbaren Energien für die Produktion synthetischer Kraftstoffe hoch sein wird, sollte parallel dazu der Ausbau der Erzeugungskapazitäten und der notwendigen Transport- und Verteilungsinfrastruktur intensiv angegangen werden, um die notwendigen Rahmenbedingungen zu schaffen, damit Produktion und Einsatz synthetischer Kraftstoffe unmittelbar beginnen können, sobald die technische Entwicklung dafür weit genug fortgeschritten ist. Der Einsatz neuer Technologien wird dabei sukzessive ablaufen. Konkurrierende Technologien zu testen wird dabei zu weiteren Lerneffekten führen und die vielversprechenden Ansätze erkennen lassen [Hekkert et al. 2011, S. 11].

Auch die Weiterentwicklung der Regulierung sollte dabei nicht außer Acht gelassen werden. Insbesondere sollten Anstrengungen unternommen werden, verbindliche Nachhaltigkeitskriterien für synthetische Kraftstoffe zu etablieren, bestenfalls auf globaler Ebene, um einen möglichst barrierefreien, weltweiten Handel zu ermöglichen. Da innerhalb der Bundesrepublik voraussichtlich die Erzeugungskapazitäten etwa für grünen Wasserstoff, selbst bei verstärktem Ausbau, nicht den Bedarf werden decken können, sollten zugleich die bereits angelaufenen Bemühungen um Länderpartnerschaften zum Import von Wasserstoff fortgeführt werden. Dies sollte dabei mehr umfassen, als lediglich Mengenkontingente auszuhandeln, die an Europa und insbesondere Deutschland geliefert werden. Vielmehr muss es darum gehen, die Partnerstaaten zugleich darin zu unterstützen, ihrerseits H<sub>2</sub>-ready zu werden und die Nachhaltigkeit des Wasserstoffhandels durch geeignete begleitende Maßnahmen zu gewährleisten. Es sollte sichergestellt werden, dass all diese Punkte einer übergreifenden strategischen Linie folgen, sodass einzelne Maßnahmen ineinandergreifen, statt sich gegenseitig zu behindern. Die bereits bestehenden strategischen Ansätze sind entsprechend anzupassen und weiterzuentwickeln.

Diese aufgezählten Maßnahmen sind als erste zu konkretisieren und umzusetzen, um einen beschleunigten Markthochlauf zu ermöglichen. Sie schaffen überhaupt erst die Voraussetzungen, damit weitere Markteinführungsmechanismen daran anschließend greifen können. Dabei geht es im ersten Schritt sowohl um die Angebots- als auch die Nachfrageseite.

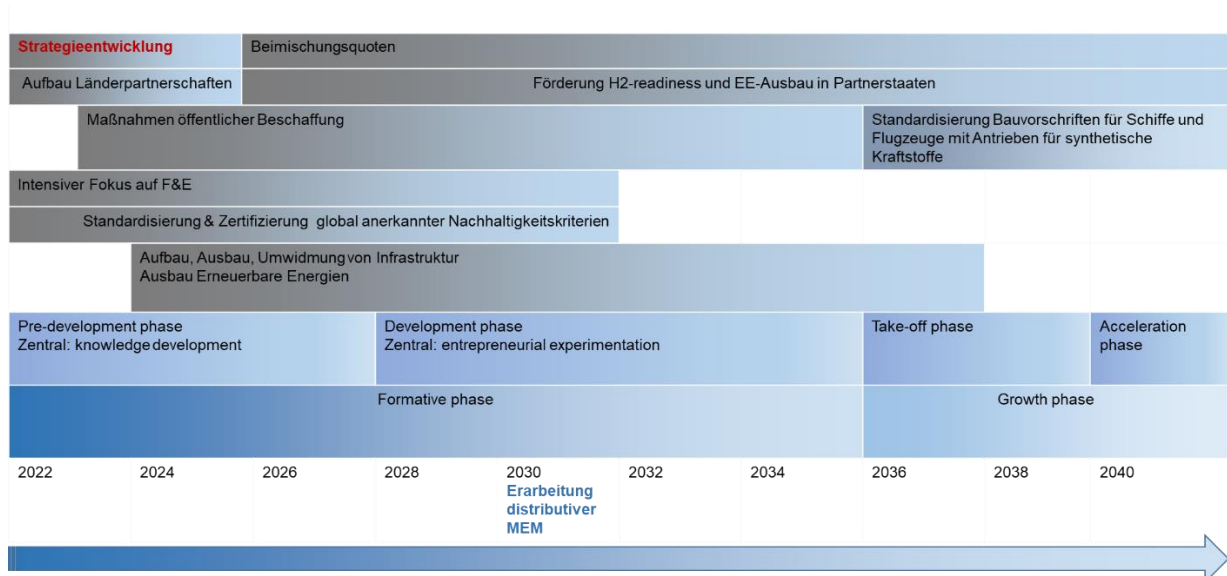
Ein zweiter Schritt sollte daraufhin darin bestehen, die Nachfrage parallel zur Steigerung des Angebots zu erhöhen. Zu diesem Zweck bieten sich Quotensysteme an, die im Zeitverlauf zunehmend verschärft werden, soweit die Steigerung des Angebots gelingt. Der Staat kann zusätzlich eine (wahrnehmbar zu kommunizierende) Vorreiterrolle durch Maßnahmen öffentlicher Beschaffung einnehmen.

Nach derzeitigem Stand ist es wahrscheinlich, dass es mindestens bis zum Beginn der 2030er Jahre dauert, ehe diese Maßnahmen umgesetzt sind und der neu entstehende Kraftstoffmarkt weit genug entwickelt ist, um auf Instrumente zu setzen, die einen engeren regulativen Rahmen setzen und auf eine weitere Beschleunigung des Marktgeschehens durch zunehmende Standardisierung zielen können. Entsprechend werden etwa detaillierte Standardisierungen

der Bauvorschriften für Flugzeuge und Schiffe, wie sie bereits diskutiert werden, erst zu diesem Zeitpunkt praktikabel werden, da zuvor die technisch sinnvollen Lösungen und notwendige Anforderungen nicht hinreichend erforscht und erprobt sein werden.<sup>49</sup>

Eine über die hier genannten Punkte hinaus gehende Planung des Einsatzes von Markteinführungsmechanismen erscheint zu diesem Zeitpunkt wenig sinnvoll, da auf dem Weg dahin eine regelmäßige Neubewertung der Entwicklung ohnehin unumgänglich sein wird. Die Dynamik dieses Politikfeldes und des im Entstehen begriffenen Marktes für synthetische Kraftstoffe ist zu groß, um bereits jetzt weiterreichende Maßnahmen ergreifen zu können. Das Augenmerk sollte sich zunächst darauf richten, die Voraussetzungen zu schaffen, damit der Markt für synthetische Kraftstoffe möglichst rasch die „formative phase“ durchlaufen kann, um die Chance zu sichern, rechtzeitig genug in eine „growth phase“ überzuwechseln, um die gesetzten Klimaschutzziele zu realisieren.

Einen schematischen Ablaufplan für den Einsatz von Markteinführungsmechanismen, der diesem Ziel entspricht, zeigt Abbildung 9-18.



**Abbildung 9-18:** Schema einer möglichen Marktentwicklung und korrespondierender Einsatz von Markteinführungsmechanismen

<sup>49</sup> Allerdings besteht das Problem, dass eine Flottenerneuerung rechtzeitig eingeleitet werden muss, da Schiffe und Flugzeuge über Jahrzehnte im Einsatz sein können. Eventuell bedarf es daher Übergangsregelungen dergestalt, dass neue Motoren etwa grundsätzlich für den Einsatz synthetischer Kraftstoffe ausgelegt sein sollen. Die Schaffung ungewollter Pfadabhängigkeiten gilt es zu vermeiden. Gleichzeitig können Bestimmungen für Standards nur soweit erlassen werden, wie mit hinreichender Sicherheit die technischen Möglichkeiten und Notwendigkeiten bereits absehbar sind. Hier kann es insofern zu herausfordernden Zielkonflikten kommen.

## 10 Schlussfolgerungen und Handlungsoptionen

In Kapitel 10 werden die Ergebnisse und Erkenntnisse aus den in Kapitel 3 bis 9 detailliert beschriebenen Analysen zusammengefasst. Aufbauend auf den Erkenntnissen werden spezifische Handlungsoptionen für die Kraftstoffherstellung sowie die Nutzung der Kraftstoffe in der Luft- und Schifffahrt und im bodengebundenen Verkehr abgeleitet. Die Handlungsoptionen betreffen insbesondere

- Strategien zur Förderung von Forschungs- und Entwicklung,
- Strategien für den Markthochlauf und regulatorische Anforderungen und
- Strategien zur Förderung von gesellschaftlicher Akzeptanz.

### 10.1 Herstelltechnologien

In diesem Abschnitt sollen Fragestellungen zu den Herstelltechnologien adressiert werden:

- Verfügbarkeit von Kraftstoffen global / Ressourcenpotenziale / Länderanalysen
- Ab wann lässt sich wieviel Kraftstoff herstellen? Wie viel muss importiert werden?
- Gesamtmengen an benötigten Kraftstoffen für alle Verkehrsbereiche (techn. Verfügbarkeiten, Nachfragen, ökologische Erfordernis)

#### 10.1.1 Herstellungspotenziale von synthetischen Kraftstoffen

Für die Herstellung von synthetischen Kraftstoffen müssen zusätzliche Energiebereitstellungstechnologien installiert werden. Das Modell kann im Rahmen der verfügbaren Potenziale neue Energiebereitstellungsanlagen installieren. Dabei wird ein hoher Anteil des Imports von flüssigen Kraftstoffen angenommen. Wasserstoff und Methan werden jedoch größtenteils inländisch bereitgestellt. Tabelle 10-1 zeigt, wie weit die Potenziale vom Modell genutzt wurden. Dabei werden diese in Deutschland weitgehend ausgenutzt, lediglich Wind-Offshore wird nicht vollständig genutzt. Dies zeigt, dass Deutschland für Kraftstoffe zu großen Teilen auf den Import angewiesen sein wird, da es für die inländische Herstellung nicht genügend erneuerbare Potenziale gibt.

In den analysierten EU-Ländern sind deutlich mehr Reserven für die Herstellung vorhanden. Die in Europa verfügbaren Ressourcen werden nur zu einem kleineren Teil ausgenutzt. Grundsätzlich könnte sich Europa daher aufgrund der großen PV- und Offshore-Wind-Potenziale selbständig mit synthetischen Kraftstoffen versorgen.

**Tabelle 10-1:** Ausgenutzte EE-Potenziale in 2050

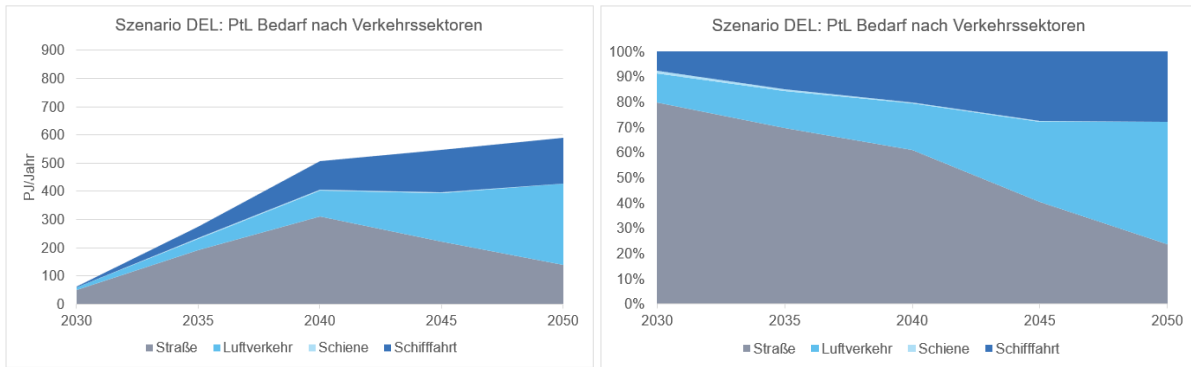
Erneuerbare Ressourcen	Deutschland			Europa		
Technologie	Installierbar [GW]	Installiert [GW]	Nutzung	Installierbar [GW]	Installiert [GW]	Nutzung
Laufwasserkraft	5	5	100%	134	33	24%
PV	399	395	99%	7285	492	7%
Wind Offshore	80	71	88%	6284332	192	0%
Wind Onshore	151	150	99%	6092	674	11%
Summe	635	620	98%	6297844	1390	0%

### 10.1.2 Herausforderungen für den Produktionshochlauf

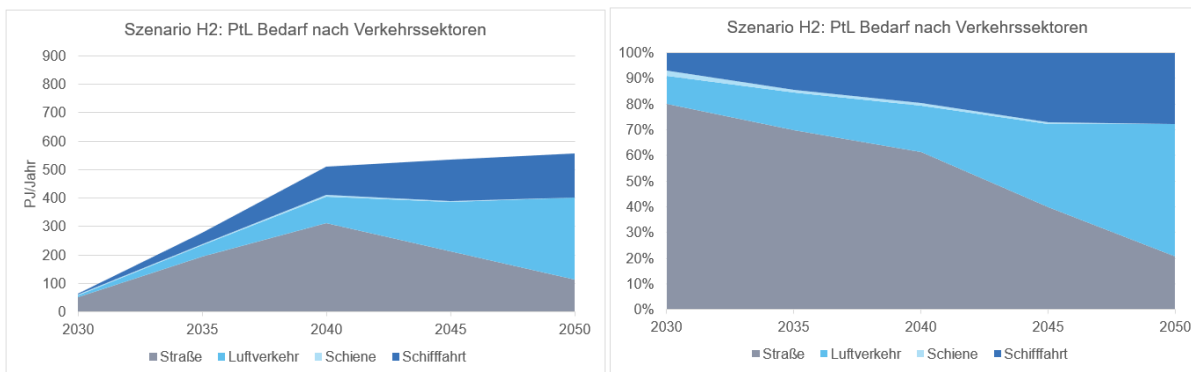
Für den Produktionshochlauf gibt es zwei wesentliche Herausforderungen, die erste Etappe des Hochlaufs bis in die 2030er Jahre und die Struktur der hergestellten Produkte.

Die Bedarfsanalysen aus den Szenarien in Kapitel 6.7 (Abbildung 6-17 bis Abbildung 6-19) zeigen, dass unter den getroffenen Annahmen in allen Szenarien ein sehr starker Ausbau der Bereitstellung von synthetischen Kraftstoffen ab 2030 notwendig ist, um die verschiedenen Verkehrsbereiche zu defossilisieren. In allen Verkehrsbereichen wird dies 2030 auch die Bestandsflotte betreffen, weswegen hier Drop-In-Kraftstoffe, welche die bestehenden fossilen Kraftstoffe ersetzen oder diesen beigemischt werden können, eine wesentliche Rolle spielen. Für das Jahr 2030 liegen die Mengen, je nach Szenario, bei 40.000 bis 232.000 Tonnen Kraftstoffen. Der Bedarf steigt dann bis 2040 weiter stark an und liegt bis dahin bei 10 bis 15 Mio. Tonnen pro Jahr.

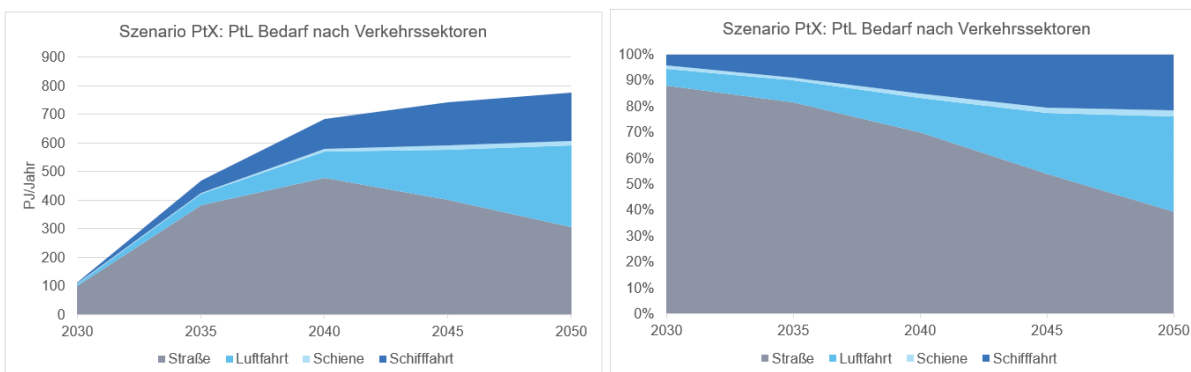
Die zweite Herausforderung liegt darin, dass der Kraftstoffbedarf durch die Beimischung im Straßenverkehr in den Szenarien zunächst stark steigt, zwischen den Jahren 2030 bis 2040 ein Maximum erreicht und danach wieder zurückgeht. Der Grund dafür ist, dass die synthetischen Kraftstoffe zunächst zur Defossilisierung des Bestandes gebraucht werden und dann aber die Verbrenner aus der Bestandsflotte nach und nach aus dem Straßenverkehr verschwinden. Die Abbildung 10-1 bis Abbildung 10-3 zeigen die absoluten Mengen der, unter den getroffenen Annahmen, im Transportsektor benötigten Energiemengen jeweils auf der linken Seite und die relative Verteilung auf der rechten Seite.



**Abbildung 10-1:** Kraftstoffbedarf nach Verkehrsbereichen für das DEL-Szenario



**Abbildung 10-2:** Kraftstoffbedarf nach Verkehrsbereichen für das H2-Szenario



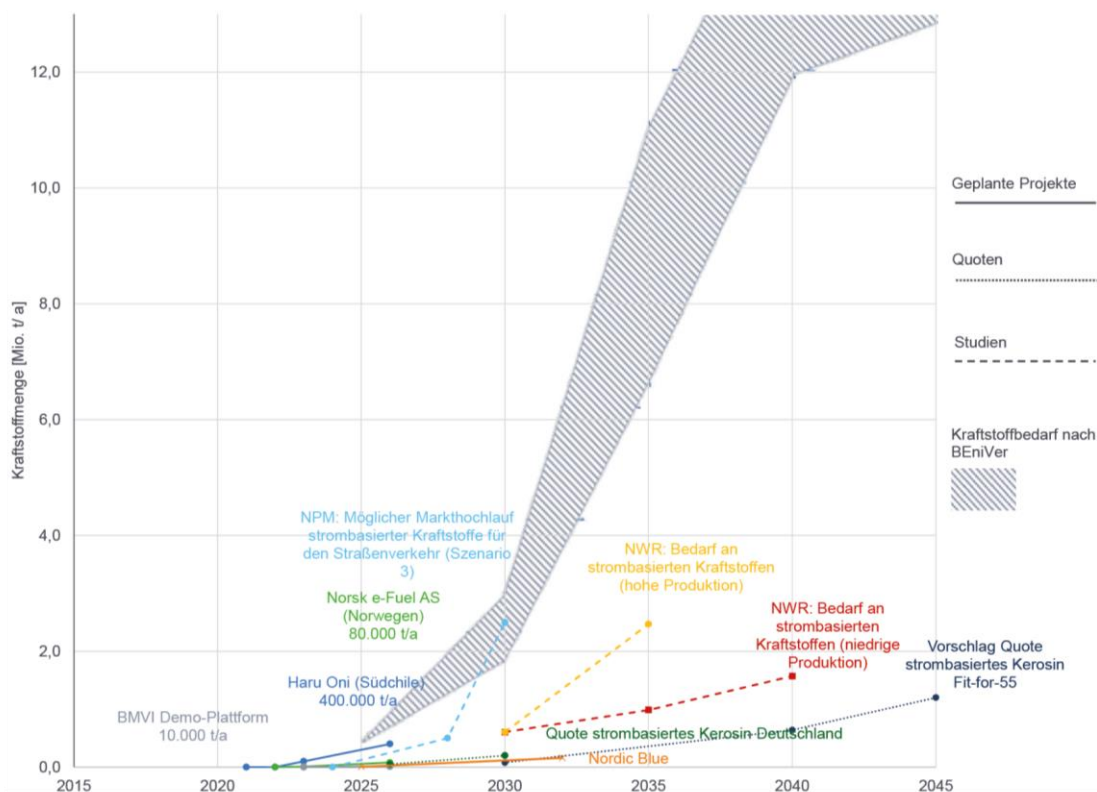
**Abbildung 10-3:** Kraftstoffbedarf nach Verkehrsbereichen für das PtX-Szenario

Die Verteilungen sind im DEL- und H2-Szenario recht ähnlich, im PtX-Szenario werden deutlich mehr PtL-Kraftstoffe für den Straßenverkehr benötigt. Auf der rechten Seite zeigen alle drei Szenarien ein ähnliches Verhalten, während der Anteil des Straßenverkehrs (= Diesel + Benzin) bei 80 % bis 90 % liegt, verändert er sich bis 2050 auf etwa 20 % im DEL- und H2-Szenario und 50 % im PtX-Szenario. Benzin und Diesel werden nur für eine Übergangszeit in größeren Mengen gebraucht. Die neu zu bauenden Anlagen müssen also im Laufe der Zeit das Mengenverhältnis der herzustellenden Kraftstoffe verändern. Dies ist nur mit neuen Investitionen und Nachrüstungen möglich.

Um eine langfristige Auslastung der Herstellungsanlagen zu erreichen, wäre es sinnvoll vor allem Kerosin für den Luftverkehr und Schiffskraftstoffe herzustellen, die auch nach 2050 sicher gebraucht werden. Die gezeigten Mengenverhältnisse basieren im Wesentlichen auf den angenommenen Beimischungsquoten im Straßen- und Luftverkehr, die im Straßenverkehr linear auf 100 % bis 2045 steigen und im Luftverkehr auf 70 % SAF (gemäß Kommissionsvorschlag ReFuelEU Aviation / Fit-for-55) bis 2050 steigen. Durch eine Veränderung der Beimischungsquoten in Luft- und Straßenverkehr könnte ein gleichmäßigeres Produktionsverhältnis mit höherem Kerosinanteil erreicht werden.

### Kraftstoffbereitstellung

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) betragen [Bundesregierung 2021b, S. 19]. Darüber hinaus wird im Rahmen des Fit-for-55-Pakets [EC 2021b, S. 3] der Europäischen Kommission eine Beimischungsquote von strombasierten Kraftstoffen 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 10-4:** Bedarf an strombasierten Kraftstoffen und angekündigte Produktionskapazität in ausgewählten Projekten [Arndt et al. 2021; Hauptmeier 2021; Nordic; Norsk; Haru Oni; Wasserstoffrat 2021; NPM 2021]

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

### **10.1.3 Übersicht der Technologieoptionen und Stand der Technik**

Bei den Herstellungstechnologien von synthetischen Kraftstoffen ist prinzipiell zwischen der Bereitstellung von dem Synthesegas und den eigentlichen Synthesen zu unterscheiden. Für die Bereitstellung vom Synthesegas ist eine Wasserstoffquelle sowie je nach Produkt eine Kohlenstoff- bzw. eine Stickstoffquelle erforderlich.

#### **10.1.3.1 Wasserstoffbereitstellung**

Für die Bereitstellung von reinem Wasserstoff stehen mehrere Elektrolysetechnologien zur Verfügung:

- die klassische alkalische Elektrolyse mit einer Lauge als Elektrolyt (AEL)
- die AEM- (anion exchange membrane) Elektrolyse, welche ebenfalls im alkalischen Milieu, jedoch mit festem Elektrolyt arbeitet
- die PEM- (proton exchange membrane) Elektrolyse
- sowie die Hochtemperatur-Festoxid- (SOEC) Elektrolyse

Bei letzterer gibt es zusätzlich die Möglichkeit, neben reinem Wasserstoff zusätzlich CO zu erzeugen, indem neben Wasser auch CO<sub>2</sub> in die Elektrolyseeinheit geleitet wird. Die Technologien unterscheiden sich durch unterschiedliche Aspekte wie Energiebedarf, Lastwechselverhalten, Kritikalität der Rohstoffe, Marktreife, dem Ausgangsdruck oder der Option von reinem Sauerstoff als Nebenprodukt. Die Tabelle 10-2 listet die unterschiedlichen Eigenschaften qualitativ auf.

**Tabelle 10-2:** Eigenschaften der Elektrolysetechnologien

	Energiebedarf	Flexibilität	Druckniveau	Rohstoffe	O <sub>2</sub> als Nebenprodukt
<b>AEL</b>	o	+	+	+	+
<b>AEM</b>	o	+	+	+	+
<b>PEM</b>	o	+	+	-	+
<b>SOEC</b>	+	-	-	+	-

Von jeder Technologie gibt es in Deutschland mindestens einen Hersteller, bei welchem die jeweilige Elektrolysetechnologie erhältlich ist. Es gibt jedoch noch große Unterschiede bei der maximalen Größe des Stacks, also der Grenze ab welcher kein „Scale-up“, sondern ein „numbering-up“ erforderlich ist, um die Kapazität weiter zu erhöhen. So hatte im Jahr 2021 das Größte Festoxidzellen-Elektrolysemodul, bestehend aus 60 Stacks, eine Kapazität von 225 kW [Sunfire 2021]. Bei der PEM-Elektrolyse sind die Stacks bereits im Megawatt Maßstab [Hoeller Electrolyzer 2022]. Bei der alkalischen Elektrolyse sind Module bis zu 20 MW verfügbar [thyssenkrupp 2022].

Der Energiebedarf für die Elektrolyse von flüssigem Wasser liegt nach heutigem Stand in der Größenordnung von 50 kWh<sub>el</sub>/kg<sub>H<sub>2</sub></sub> und wird perspektivisch auf 45 kWh<sub>el</sub>/kg<sub>H<sub>2</sub></sub> sinken. Die SOEC arbeitet bei hohen Temperaturen um die 800 °C und arbeitet mit Wasserdampf, wodurch der elektrische Energiebedarf bereits heute bei ca. 40 kWh<sub>el</sub>/kg<sub>H<sub>2</sub></sub> liegt, wobei hier noch der Energiebedarf für die Verdampfung berücksichtigt werden muss. Bis auf die SOEC können alle Elektrolysen relativ flexibel betrieben werden, Wasserstoff bei 30 bar und höher zur Verfügung stellen und bieten die Möglichkeit, reinen Sauerstoff als Nebenprodukt zu nutzen. Aufgrund des Bedarfs an Edelmetallen ist die PEM-Elektrolyse aus der Sicht der Rohstoffverfügbarkeit negativ zu bewerten. Hierbei gibt es jedoch bereits Forschungsansätze die Iridiumbelastung auf 10 % des heutigen Wertes zu reduzieren.

Eine weitere Möglichkeit der Wasserstoffbereitstellung ist die Nutzung von solarthermischen Prozessen. Dabei wird Wasser nicht elektrochemisch, sondern über ein Metalloxid katalytisch gespalten. In diesem Prozess wird das Metalloxid bei hohen Temperaturen reduziert, wodurch reiner Sauerstoff entsteht und sog. „Sauerstoff Fehlstellen“ im Material zurückbleiben. Anschließend wird das abgekühlte Material mit Wasser in Kontakt gebracht, wodurch die Fehlstellen wieder mit Sauerstoff besetzt werden, welcher aus dem Wassermolekül stammt. Diese Technologie erfordert hohe Temperaturen und somit sonnenreiche Standorte.



### 10.1.3.2 Kohlenstoffbereitstellung

Als Kohlenstoffquelle stehen zum einen biogene Quellen wie Biogas oder Biomasse zur Verfügung, wobei hierbei auf die Tank-Teller Problematik hinzuweisen ist. Des Weiteren kann CO<sub>2</sub> verwendet werden, welches entweder von industriellen Punktquellen über Aminwäschen oder aus der Luft entnommen werden kann.

Die Vergasung von Biomasse zur Erzeugung von Kohlenwasserstoffen ist eine fortgeschrittene Technologie. Gleiches gilt für Aminwäschen. Die Anreicherung von CO<sub>2</sub> aus der Luft wird als „Direct air capture“ (DAC)-Prozess bezeichnet.

### 10.1.3.3 Stickstoffbereitstellung

Für die Ammoniaksynthese wird Stickstoff benötigt, welcher aufgrund der hohen Konzentration direkt aus der Luft entnommen wird. Auch hier gibt es mehrere Möglichkeiten der Bereitstellung, wobei jede Technologie ausgereift ist. Diese sind

- Kryogene Luftzerlegung
- Druckwechseladsorption und
- Membranverfahren

Je nach Mengenbedarf und Standortbedingungen ist zu unterscheiden, welche Option besser ist.

### 10.1.3.4 Kraftstoffsynthese

Mit den Edukten H<sub>2</sub> und CO<sub>2</sub> kann, zumindest theoretisch, jeder als Kraftstoff in Betracht kommende Stoff synthetisiert werden. Trotz der Vielzahl an alternativen Kraftstoffen lassen sich die eigentlichen Herstellungsprozesse in drei „Hauptsynthesen“ sowie eine Gruppe an Synthesen clustern. Diese sind:

- Methanisierung (Sabatier-Reaktion)
- Fischer-Tropsch-Synthese und
- Methanolsynthese

je als „Hauptsynthese“. Als Gruppe an Synthesen gibt es eine Vielzahl an „Methanolderivaten“, also Kraftstoffherstellungsprozesse die auf Methanol als Zwischenprodukt basieren. Die relevantesten sind:

- DME-Synthese
- OME-Synthese
- Methanol-to-Gasoline (MtG) und
- Methanol-to-Kerosin (MtK)

Die Hauptsynthesen sind an sich technisch ausgereift. Lediglich bei der Verschaltung der gesamten Systeme inkl. der Kohlenstoff- und Wasserstoffbereitstellungen, und bei eventuellen flexiblen Betriebsweisen, gibt es noch Herausforderungen und sie sind daher noch nicht Stand der Technik. Des Weiteren nutzen die Methanisierung und die Methanolsynthese meist noch

CO-reiches Feedgas statt der direkten Nutzung von CO<sub>2</sub>. Dabei haben beide Synthesen den Vorteil, dass CO<sub>2</sub> direkt eingesetzt werden kann. Bei der Fischer-Tropsch-Synthese muss, zumindest bei den heute üblichen Katalysatoren, das CO<sub>2</sub> zuvor zu CO reduziert werden. Für diesen Teilschritt gibt es vier Möglichkeiten:

- reverse Wasser-Gas-Shift (rWGS) - chemische Reduktion mit H<sub>2</sub> zu CO
- Nutzung der Co-SOEC – Wasserelektrolyse und CO<sub>2</sub> Reduktion in einer Unit
- plasmalytische Reduktion und
- reine CO<sub>2</sub>-Elektrolyse

Keine der genannten Optionen wird heute großskalig eingesetzt um CO<sub>2</sub> zu CO zu reduzieren. Dies liegt jedoch an den, vergleichsweise günstigen, fossilen Alternativen und nicht an technologischen Hürden, zumindest bei der rWGS und der Co-SOEC.

Bei Methanolderivaten sind die DME-Synthese sowie der MtG-Prozess technisch ausgereift. Bei dem MtK-Verfahren überschneiden sich Teilschritte mit dem MtG-Prozess, jedoch ist das Verfahren noch relativ neu und nicht Stand der Technik. Bei der OME-Synthese gibt es eine Vielzahl an Routen, wie man vom Methanol zu einer Mischung von OME<sub>3-5</sub> kommt. Alle basieren auf Methanol als Ausgangsprodukt. Als Stand der Technik kann die Route über Trioxan und Methylal angesehen werden. Weitere Routen führen über Formaldehyd, sind jedoch technisch aufwendiger und nicht Stand der Technik.

#### 10.1.3.5 **Nachgeschaltene thermische Verfahrene ohne chemische Reaktionen**

Nach der Kraftstoffsynthese sind noch unterschiedliche thermische Verfahren erforderlich um entweder die Mischung aus der Synthese in die einzelnen Fraktionen zu trennen, wie beispielsweise bei der Fischer-Tropsch-Synthese oder der Methanolsynthese. Bei letzterer wird das Nebenprodukt Wasser abgetrennt, bei der Fischer-Tropsch-Synthese ist es die klassische Aufteilung in Benzin, Kerosin etc. Bei anderen Kraftstoffen kann ein Verflüssigungsschritt erforderlich sein, um den Kraftstoff in einen transportablen Zustand zu bringen. Dies berücksichtigt die Verflüssigung von Wasserstoff und Methan. Alle Prozesse sind Stand der Technik, nur bei der Wasserstoffverflüssigung gibt es noch Herausforderungen bzgl. des Upscalings. Bestehende Anlagen in Deutschland haben eine Kapazität von 5 Tonnen pro Tag (t/d), was einer thermischen Leistung von ca. 7 MW<sub>LHV</sub> entspricht.

#### 10.1.4 **F&E Bedarfe**

Um den Bedarf an weiteren Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten abzuschätzen, wurden auf der BEniVer Statuskonferenz am 1. Juli 2022 mehrere Workshops abgehalten, bei welchen die Beteiligten der Förderinitiative „Energiewende im Verkehr“ zu diesem Thema ihre Einschätzung liefern konnten. Diese werden hier wiedergegeben.

##### 10.1.4.1 **F&E Bedarfe bei den Herstellungsprozessen**

Die Unterteilung erfolgt ähnlich zu Kapitel 10.1.3, jedoch nur mit Fokus auf die H- und C-Quelle sowie der eigentlichen Kraftstoffsynthese. Die Stickstoffquelle sowie die nachgeschalteten Prozesse wurden im Workshop nicht explizit behandelt. Zusätzlich zu den Ergebnissen des

Workshops sei angemerkt, dass die Reduktion der Stromkosten den wichtigsten Hebel für die Kostenreduktion von synthetischen Kraftstoffen aus PtX-Prozessen darstellt, da diese den größten Anteil zu den Produktgestehungskosten beitragen.

Die F&E-Bedarfe werden in den folgenden Abschnitten in „neuartige Forschungsansätze“ und „Entwicklungsbedarfe“ unterteilt. Ersteres bezieht sich auf Grundlagenforschung mit disruptiven und neuartigen Konzepten. Diese stehen noch weit vor der Kommerzialisierung. Mit „Entwicklungsbedarfen“ sind bestimmte Zielvorgaben verbunden, beispielsweise um konkrete Werte bei Effizienzen, Kosten oder Produktionskapazitäten zu erreichen. Entwicklungsbedarf gibt es bei Technologien, welche kurz vor der Kommerzialisierung sind sowie bei Technologien, welche bereits am Markt verfügbar sind.

#### Wasserstoffbereitstellung (H-Quelle):

Aus Sicht der Workshopteilnehmenden gibt es bei der Wasserelektrolyse keine grundlegend neuen Forschungsansätze. Als alternative Bereitstellungsmethoden werden Forschungsansätze der biologischen oder (solar-)thermischen Routen verfolgt.

Entwicklungsbedarfe werden bei der Wasserelektrolyse und der Plasmalyse gesehen. Bei ersterer wurde auf die Hochskalierung der Produktionskapazitäten, der Reduktion des Materialbedarfs sowie einem vereinfachten Wassermanagement hingewiesen. Für die Plasmalyse wurde ebenfalls die Hochskalierung sowie eine Vereinfachung der nachgeschalteten Gasreinigung identifiziert.

Weiterhin sei auf die Expertenempfehlung des Forschungsnetzwerks Wasserstoff hingewiesen.

#### Kohlenstoffbereitstellung (C-Quelle)

Als neuartige Forschungsansätze wurde die kombinierte Bereitstellung von CO<sub>2</sub> und H<sub>2</sub>O aus der Luft thematisiert sowie die Integration von Anlagen, welche CO<sub>2</sub> aus der Luft beziehen, an Orten wo ohnehin eine aktive Belüftung stattfindet.

Bei den Entwicklungsbedarfen wurde allgemein auf die CO<sub>2</sub>-Logistik sowie die Hochskalierung (in Stückzahlen sowie Kapazität pro Einheit) von Anlagen, welche CO<sub>2</sub> aus der Luft abscheiden, hingewiesen.

Darüber hinaus sei auf das vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) geförderte Projekt Carbon2Chem hingewiesen. Das Verbundprojekt will Prozessgase der Industrie als Kohlenstoffquelle für die chemische Industrie erschließen und wird vom Fraunhofer UMSICHT, der thyssenkrupp AG und dem Max-Planck-Institut für Chemische Energiekonversion koordiniert. [Fraunhofer UMSICHT]

#### Kraftstoffsynthese

Neuartige Forschungsansätze beziehen sich auf einen Teilschritt bestimmter Herstellungsverfahren, der Reduktion von CO<sub>2</sub> zu CO. Hier werden plasmainduzierte Prozesse oder neuartige rWGS-Konzepte vorgeschlagen. Alternativ dazu wurden FT-Katalysatorkonzepte diskutiert,

welche direkt  $\text{CO}_2$  und  $\text{H}_2$  als Synthesegas nutzen und den ganzen Teilschritt der rWGS als eigenständigen Prozess obsolet machen.

Als Entwicklungsbedarf wurde allgemein die flexible Betriebsweise von Kraftstoffsynthesen hervorgehoben sowie die Gesamtintegration von PtX-Anlagen inkl. der Nebenprodukt- und Abwärmenutzung in das Energiesystem. Des Weiteren wurde der Methanol-to-Kerosin-Prozess als alternative Bereitstellung von Flugtreibstoff thematisiert.

Bei den Kraftstoffherstellungsprozessen sind die Forschungsaktivitäten sehr weit fortgeschritten. Fast alle wesentliche Teilschritte sind bekannt und kommerziell verfügbar. So gibt es eine Vielzahl an Großprojekten, bei welchen Elektrolysen im MW- bzw. GW-Maßstab gebaut werden. Auch die Fischer-Tropsch-Synthese oder die Methanol-Synthese gibt es seit mehreren Jahrzehnten im großtechnischen Maßstab. Diese basieren jedoch bisher auf fossilen Rohstoffen, bei welchen CO und kein  $\text{CO}_2$  eingesetzt wird. Aus diesem Grund gibt es bisher wenig großtechnische Erfahrung bei der Reduktion von  $\text{CO}_2$  und allgemein bei Synthesen mit  $\text{CO}_2$  als Feed. Auch die Bereitstellung von  $\text{CO}_2$  aus der Luft birgt noch viel Entwicklungspotenzial bezüglich der technischen und ökonomischen Optimierung. Gleiches gilt für die Kerosinherstellung auf Basis von Methanol, welche noch nicht technisch ausgereift ist und Entwicklungspotenzial birgt. In **Tabelle 10-3:** sind die Ergebnisse nochmals zusammengefasst. Dabei wird zwischen neuartigen Forschungsansätzen (NF) und Entwicklungsbedarfen (EB) unterschieden. Nennungen auf beiden Seiten sind möglich, da sich auf unterschiedliche Technologien bezogen werden kann. Auch bei technisch ausgereiften Prozessen gibt es zusätzlich stetigen Verbesserungsbedarf.

**Tabelle 10-3:** Auflistung des F&E-Bedarfs der Herstellungstechnologien

Neuartige Forschungsansätze	Entwicklungsbedarfe
<ul style="list-style-type: none"> <li>• (Solar-)Thermische und biologische Bereitstellung von <math>\text{H}_2</math></li> <li>• <math>\text{CO}_2</math>-aktive Prozesse</li> <li>• Reduktion von <math>\text{CO}_2</math> zu CO</li> <li>• Integration von Gesamtsystemen</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Bereitstellung von <math>\text{CO}_2</math> aus der Luft</li> <li>• <math>\text{CO}_2</math>-aktive Prozesse</li> <li>• Reduktion von <math>\text{CO}_2</math> zu CO</li> <li>• Methanol-to-Kerosin</li> </ul>

Abschließend sei angemerkt, dass das Kostenreduktionspotenzial durch die Weiterentwicklung der eigentlichen Herstellungstechnologien begrenzt ist, da bereits heute bei allen Prozessen die Stromkosten die finalen Gestehungskosten stark dominieren.

### Emissionen und Wirkungen auf Klima und Luftqualität

Im Zusammenhang mit der ökologischen Bewertung der Herstellungsprozesse wurden hier zunächst lediglich die Emissionen langlebiger Treibhausgase berücksichtigt. Zukünftig sollten zudem Untersuchungen zu möglichen, bei der Herstellung und auch Bereitstellung alternativer Kraftstoffe, freigesetzten Emissionen kurzlebiger Komponenten (wie z.B. Stickoxide oder Kohlenwasserstoffe) und ihren Wirkungen auf Klima und Luftqualität erfolgen (vgl. auch Kapitel 0). Dabei sollten auch Sekundäreffekte der Emissionen Berücksichtigung finden, wie etwa die

Bildung von Ozon oder sekundärem Aerosol. Ein möglicher neuer Aspekt, der bereits Gegenstand laufender Forschungen ist, aber weiterer Vertiefung bedarf, wäre die Freisetzung von Wasserstoff durch Leckagen und Diffusionsprozesse in Leitungs- und Speichersystemen sowie die entsprechenden Wirkungen auf das Klima. In ähnlicher Weise sollten auch mögliche Wirkungen von  $\text{NH}_3$ -Entweichungen betrachtet werden, sofern dessen Nutzung als alternativer Kraftstoff im Schiffsverkehr weiter erwogen wird.

#### 10.1.4.2 **F&E Bedarfe in der Systemanalyse**

Aus systemanalytischer Sicht ist insbesondere hervorzuheben, dass in der Zukunft möglicherweise mehrere Sektoren um die, erst schrittweise herstellbaren, synthetischen Kraftstoffe konkurrieren könnten. Dazu gehört neben den Anwendungen im Verkehrssektor (Flugverkehr, Schifffahrt und bodengebundener Verkehr) insbesondere der Industriesektor, der teilweise hohe Energiebedarfe hat oder auf Wasserstoff und seine vielfältigen Folgeprodukte in diversen Prozessen oder als Grundstoff angewiesen ist. Weitere konkurrierende Sektoren könnten auch die Bereitstellung von Prozesswärme oder von Niedertemperaturwärme sowie die Rückverstromung sein. In der Summe wird es daher wichtig werden, die **Bereiche Luftfahrt und Schifffahrt in der Forschung zu priorisieren**, in denen aus heutiger Sicht eher wenige Alternativen zu den diversen synthetischen Kraft- und Treibstoffen bestehen. Je nach gewählter Prozessroute ergeben sich jedoch auch **Koppelprodukte**, die eher in anderen Sektoren bzw. Bereichen einsetzbar sind, wie dies aktuell bei der Fischer-Tropsch-Synthese der Fall sein sollte. Wichtig ist es daher, zu untersuchen, in welchen **Mengenverhältnissen** die jeweiligen Kraftstoffe, insbesondere synthetisches Kerosin und seine Koppelprodukte, herstellbar sind. Hier kann es einerseits notwendig sein, die Produktionsprozesse auf den Output von Kerosin hin zu optimieren und andererseits, für eine **gesamtsystemisch sinnvolle Nutzung möglicher Koppelprodukte** zu sorgen. Diese Aspekte sollten bereits beim Aufbau der notwendigen Herstellungs- und Transportinfrastrukturen für synthetische Kraftstoffe berücksichtigt werden. Ggf. ist zu erforschen, ob (und ggf. wie) sich beide Strategien sinnvoll miteinander vereinbaren lassen. Dies ist vor allem im Hinblick auf die jeweils **notwendigen Transport- und Verteilungsinfrastrukturen** zu beachten, wo der Ausbau paralleler Systeme vermieden werden sollte. Wichtig ist dabei auch die Untersuchung der notwendigen (De-)Zentralität und geographischen Verteilung der benötigten Infrastrukturen, so z. B. die ausreichende Kerosin-Versorgung der Flughäfen.

#### 10.1.5 **Markthochlauf**

Die im Rahmen von BEniVer erarbeiteten Modellierungsergebnisse lassen nicht erwarten, dass die angenommenen, zukünftigen Bedarfe der Bundesrepublik Deutschland an synthetischen Kraftstoffen mittels inländischer Produktion allein ausreichend gedeckt werden können. Aller Voraussicht nach wird sich die Notwendigkeit ergeben, **zumindest einen Teil der benötigten Kraftstoffmengen über Importe abzudecken**, wobei aus Gründen der Glaubwürdigkeit auch die inländische und die EU-Produktion intensiviert werden sollten. Das Feld möglicher Handelspartner erweist sich dabei als divers. Angesichts der Unsicherheiten in Bezug auf die jeweiligen Handelspartner erscheint es wenig sinnvoll, Markteinführungsmechanismen für einzelne Länder zu entwerfen. Um sich nicht in die Abhängigkeit von unwägbareren politischen Entwicklungen zu begeben, und über ein möglichst handhabbares Vorgehen zu verfügen, erfolgt die **Entwicklung von Markteinführungsmechanismen stattdessen für verschiedene**

**Gruppen ähnlicher Länder.** Dabei haben sich drei Faktoren als ausschlaggebend für die Ein-  
gruppierung potenzieller Handelspartner erwiesen: zum ersten die H<sub>2</sub>-readiness eines Staates,  
zum zweiten das Verhältnis der angenommenen EE-Potenziale des Landes zu den prognostizierten  
Eigenbedarfen und zum dritten seine angestrebte strategische Positionierung in einem  
entstehenden Wasserstoffmarkt. Durch die Bestimmung dieser drei Faktoren lässt sich  
jedes beliebige Land einem von sechzehn Ländertypen eindeutig zuordnen. Diese sind in sehr  
unterschiedlichem Maße für MEM relevant. **Staaten mit EE-Potenzialen, die unterhalb des  
Eigenbedarfs liegen, kommen im Sinne einer nachhaltigen Kraftstoffproduktion nicht für die  
Entwicklung von MEM für Kraftstoffexporte in Frage.** Solche Staaten sollten sich  
darum bemühen und dabei unterstützt werden, ihre eigenen Bedarfe soweit als möglich selbst  
zu decken. **Adressaten geeigneter MEM sind Länder, die über EE-Potenziale oberhalb  
ihrer angenommenen Eigenbedarfe verfügen.** Diese sollen dazu angereizt werden, die von  
ihnen produzierten Überschüsse an nachhaltigen, synthetischen Kraftstoffen zu exportieren  
und sodann als Handelspartner gewonnen werden. Dabei erscheint es wichtig, den **Schwer-  
punkt auf den beschleunigten und intensivierten Ausbau der erneuerbaren Energien  
und die technologische Zusammenarbeit zu legen.**

#### **10.1.6 Regulatorische Anforderungen**

Aus gesamtsystemischer Sicht ist es vor allem wichtig zu beachten, dass effektiver Klima-  
schutz, und damit der Schutz unserer Lebensgrundlagen, nur erreicht werden kann, wenn die  
Treibhausgasemissionen massiv zurückgefahren werden und gleichzeitig diverse Kippunkte  
im globalen Klima vermieden werden [Skea et al. 2022]. Dies macht eine **schnelle Reduktion  
der Treibhausgasemissionen** notwendig.

Daher muss sich in den regulatorischen Anforderungen für den Markthochlauf die **gesamt-  
systemische Priorisierung** der Kraftstoffe in der Umsetzung der Markteinführungsmechanis-  
men widerspiegeln, weswegen die bestehenden Regeln klar auf die Deckung der Bedarfe in  
den Bereichen Schiff- und Luftfahrt ausgerichtet werden sollten. Dabei ist die Strategie für den  
Markthochlauf synthetischer Kraftstoffe in eine Gesamtstrategie zur Defossilisierung des Ver-  
kehrssektors einzubetten, die auch Maßnahmen bzgl. der Verkehrsvermeidung, der Effizienz  
und der Verkehrsverlagerung enthalten sollte. Die politische Umsetzung des Markthochlaufs  
sollte auch einen starken Akzent daraufsetzen, dass **knappe Ressourcen** (Fläche, Materia-  
lien, gesellschaftliche Akzeptanz und auch Geld) **bestmöglich eingesetzt werden.**

Aus politischer Sicht ist weiterhin darauf zu achten, dass die **Mechanismen** zum Aufbau der  
notwendigen Infrastruktur und der Verteilung der Kosten hierfür **als gerecht empfunden wer-  
den.** Bei der detaillierten Erarbeitung von Instrumenten zum Aufbau der gesamten Anlagen für  
die Herstellung synthetischer Kraftstoffe ist bei der Konzeption und der Umsetzung zu beach-  
ten, dass

- auf der globalen Ebene **nachhaltige Produktionsstrukturen** und **faire Handelsbe-  
ziehungen** mit den Importstaaten aufgebaut werden, die als gleichwertige Partnerlän-  
der behandelt werden sollten
- die Mechanismen zur Bezahlung dieser Infrastrukturen das **Verursacherprinzip be-  
achten** und

- dass hierbei auch **soziale Aspekte beachtet** werden, insbesondere, dass finanzschwächere Gruppen nicht ausgeschlossen werden, während finanzstarke Gruppen nur eine leichte Mehrbelastung spüren. Dazu gehört auch ggf. eine möglichst planbare Umlage der (zukünftigen) Kosten, die es erlaubt, etwaige Alternativen auf- und auszubauen.

### **10.1.7 Gesellschaftliche Akzeptanz**

Der Einstieg in eine großmaßstäbliche Produktion synthetischer Kraftstoffe und deren Markteinführung sollten von vorbereitenden und begleitenden Maßnahmen flankiert werden, die darauf hinwirken, dass die betreffenden Technologien und Produkte in der Gesellschaft und bei involvierten Akteursgruppen auf begründete Akzeptanz treffen. Wie die Ergebnisse der BEniVer-Akzeptanzforschung zeigen, wird die Akzeptanz von synthetischen Kraftstoffen bei allen untersuchten Akteursgruppen wesentlich mitbeeinflusst von den Bedingungen der Herstellung der Kraftstoffe. Die Ausgestaltung der Herstellungsprozesse hat Effekte auf die Kosten bzw. Preise von synthetischen Kraftstoffen und auf deren Umweltwirkungen bzw. Nachhaltigkeit (speziell ökologische und soziale Indikatoren); beides hat sich als wichtige Kriterien für die Akzeptanzbildung erwiesen. Wichtige akzeptanzrelevante Merkmale der Kraftstoffherstellung betreffen den Ort der Produktion (Deutschland, Europa, außereuropäische Regionen / Länder), den Importanteil zur Deckung des inländischen Kraftstoffbedarfs, die verwendete Stromquelle (und damit verbunden die „Farbe“ des Wasserstoffs) und die Kohlenstoffquelle (industrielle Punktquellen, biogene Quellen, DAC).

Die Untersuchungsbefunde lassen erwarten, dass die günstigsten Akzeptanzvoraussetzungen vorliegen, wenn die Herstellung synthetischer Kraftstoffe in Deutschland erfolgt (oder zumindest in einem EU-Staat), wenn zur Herstellung so weit als möglich sogenannter Überschuss-(EE-)Strom verwendet wird, grüner Wasserstoff genutzt wird und der Kohlenstoff aus DAC stammt. Diese Herstellungsbedingungen werden mit den positiv bewerteten Konsequenzen Verringerung der Abhängigkeit von Energieimporten, effiziente Nutzung heimischer EE-Produktionskapazitäten sowie Nutzung ökologisch nachhaltiger Ausgangsstoffe für die Synthese verbunden. Da mit diesen Produktionsbedingungen vermutlich besonders hohe Kosten verbunden wären, erscheinen manchen Akteursgruppen – bei höherer Gewichtung des Kostenfaktors – andere Herstellungsbedingungen attraktiver. Mehrheitlich akzeptabel wäre vermutlich für viele Akteure auch eine Produktion an Wind- und / oder Sonnenenergiereichen Standorten im Ausland unter vergleichbar hohen Umwelt- und Sozialstandards wie in Deutschland bzw. Europa und, zumindest für eine Übergangsphase, die Verwendung von Kohlenstoff aus biogenen Quellen (dann präferiert Abfallbiomasse, keine Anbaubiomasse, die Flächenkonkurrenzen verursacht). Einige Akteure würden darüber hinaus für einen begrenzten, klar definierten Zeitraum auch die Nutzung von blauem Wasserstoff akzeptieren.

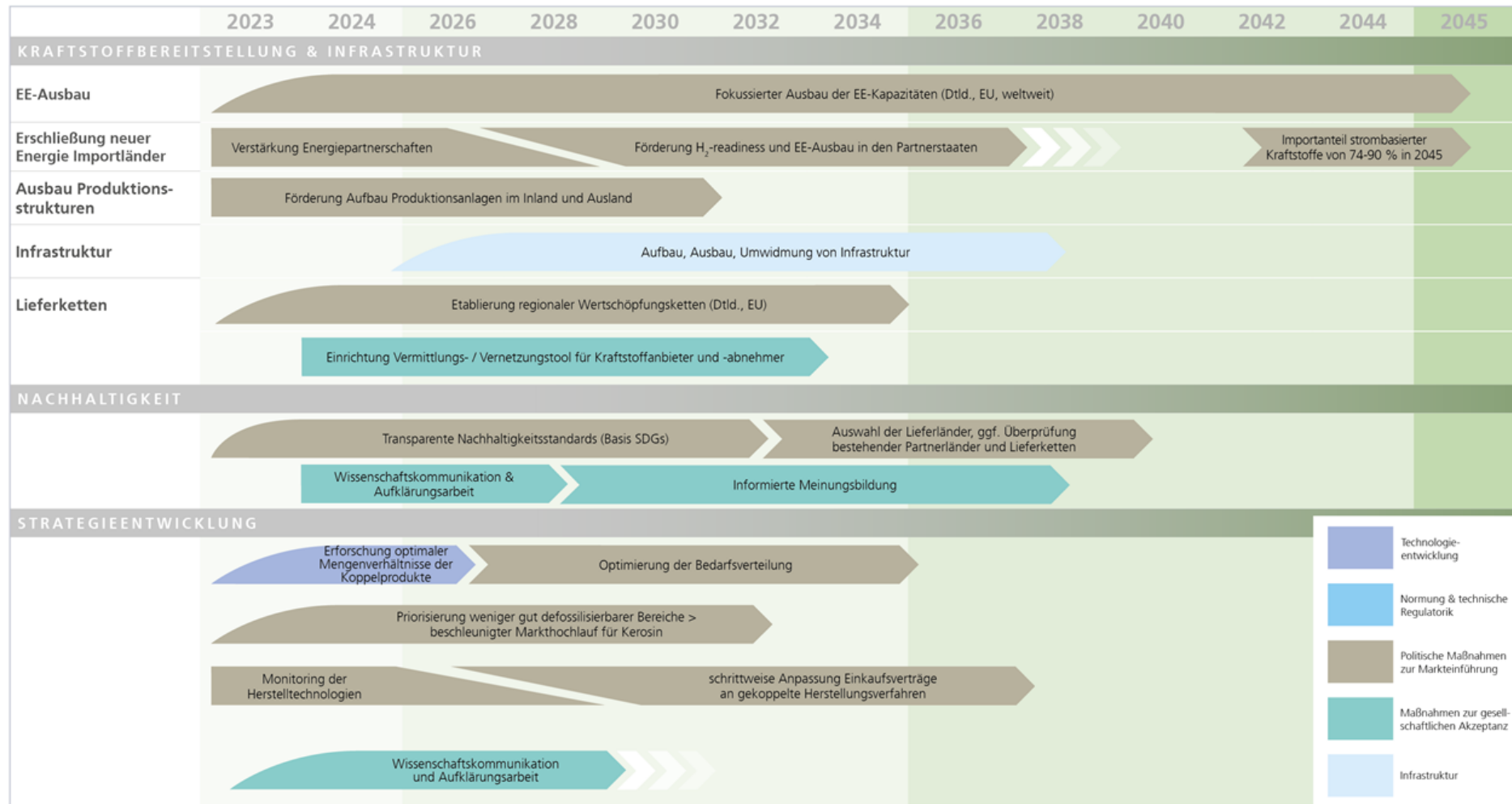
Viele Akteure wünschen sich bzw. fordern von der Politik stärkere Bemühungen zur Beschleunigung des Aufbaus von Produktionskapazitäten, sei es nun im In- oder im Ausland. Erwartet werden finanzielle Unterstützung (auch außerhalb von Förderprojekten) und die Schaffung verlässlicher regulatorischer Sicherheiten (auch und insbesondere auf Ebene der EU). Weit verbreitet ist auch die Ansicht, dass die gesamte Herstellung der Kraftstoffe – und nicht nur das Endprodukt – strenge (ökologische und soziale) Nachhaltigkeitskriterien erfüllen sollte, egal ob sie im Ausland oder in Deutschland stattfinden wird. Somit kann angenommen werden, dass eine entscheidende Grundvoraussetzung für die breite gesellschaftliche Befürwortung

von synthetischen Kraftstoffen darin besteht, dass sie tatsächlich das Potenzial haben, die THG-Emissionen, im Vergleich zu derzeit vorherrschenden fossilen Verbrennungsantrieben deutlich zu reduzieren. Wenn nicht sichergestellt wird, dass die Herstellung und Nutzung von synthetischen Kraftstoffen in der Gesamtbilanz (inklusive Herstellungsprozess) kompatibel ist mit nationalen Klimazielen und internationalen Klimaschutzverpflichtungen, ist keine ausreichende Basis für hohe sozio-politische Akzeptanz und Markt-Akzeptanz gegeben. Ebenso muss verhindert werden, dass es zu einer Verschiebung negativer Umwelteffekte auf andere Wirkungsdimensionen (neben der THG-Bilanz) kommt. Weiterhin müssen Aspekte der sozialen Gerechtigkeit und ökonomischen Fairness Beachtung finden, gerade bei Produktion im Ausland, die auch für die lokalen Gesellschaften sozio-ökonomischen und ökologischen Nutzen bringen sollte. Die Nachhaltigkeit sollte im Rahmen eines Zertifizierungsprozesses nachgewiesen werden und mittels eines vertrauenswürdigen Siegels oder Labels transparent gemacht werden.

Sollte es das Ziel sein, die Herstellung von synthetischen Kraftstoffen in Deutschland anzusiedeln, sind frühzeitig Kommunikations- und Beteiligungsprozesse vorzusehen, um die betroffene Bevölkerung umfassend über die Technologien und Infrastrukturen aufzuklären und sie in deliberative Entscheidungsprozesse einzubinden. Generell erscheint eine verstärkte (Wissenschafts-) Kommunikation und Bildungs- bzw. Aufklärungsarbeit zum Thema synthetische Kraftstoffe bzw. allgemeiner zu PtX-Technologien angeraten, als Basis für eine informierte Meinungsbildung der Bevölkerung, auch außerhalb von Expertenkreisen.



**10.1.8 Roadmap für den Produktionshochlauf synthetischer Kraftstoffe**



**Abbildung 10-5:** Roadmap zum Produktionshochlauf und zur Markteinführung synthetischer Kraftstoffe

## 10.2 Luftfahrt

### 10.2.1 Potenziale von synthetischen Treibstoffen in der Luftfahrt

2019, vor Corona, betrug der Treibstoffverbrauch der Luftfahrt weltweit insgesamt 287 Mio. Tonnen [IATA 2021], was einem Ausstoß an CO<sub>2</sub> von 914 Mio. Tonnen entspricht. Damit ist die Luftfahrt für etwa 2 % der gesamten, weltweiten CO<sub>2</sub>-Emissionen verantwortlich, wobei 80 % auf Flüge mit einer Missionsdistanz von 1.500 km und mehr entfallen [ATAG 2020]. Zusammen mit Ruß-, Aerosol- und NO<sub>x</sub>-Emissionen, deren Klimawirkung als Nicht-CO<sub>2</sub>-Effekte zusammengefasst wird, hat die Luftfahrt einen Anteil von 5 % am Strahlungsantrieb der Erdatmosphäre [Lee et al. 2021]. Das Potenzial für strombasierte **Drop-In-Treibstoffe** in der Luftfahrt ist daher als relativ hoch einzustufen. Dies liegt im Wesentlichen an der Möglichkeit, diese Kraftstoffe graduell mit einer steigenden Beimischungsquote einzusetzen, ohne am System der Treibstofflogistik (sowohl großräumig als auch am Flughafen direkt) grundlegende Änderungen durchführen zu müssen. Da Flugzeuge eine lange Lebensdauer, von bis zu 30 Jahren, haben und diese bei heutiger Indienststellung noch bis mindestens 2050 im Einsatz sein werden, ist es unumgänglich, dass ein neuer, synthetischer Treibstoff mit der heutigen Technologie kompatibel ist. Zum jetzigen Zeitpunkt sind die Luftfahrzeuge grundsätzlich in der Lage, Treibstoffe mit einem Anteil von bis zu 50 % aus synthetischer Herstellung zu verwenden. Hinzu kommt der steigende Bedarf: Langfristig wird in Deutschland, Europa und weltweit eine steigende Luftverkehrsnachfrage um etwa 3-4 % pro Jahr [ICAO 2021] erwartet. Die Effizienzsteigerungsmaßnahmen von Flugzeugen, insbesondere der Triebwerke, werden voraussichtlich prozentual geringer ausfallen als die Wachstumsrate der Verkehrsnachfrage. Daher wird gegenwärtig ein Anstieg der Treibstoffnachfrage um durchschnittlich 1,5-2 %<sup>50</sup> pro Jahr erwartet, was auch eine steigende Nachfrage für synthetische, klimaneutrale Treibstoffe im Luftverkehr bedeutet.

Die Nachfrage nach synthetischen Kraftstoffen aus Biomasse, Reststoffen oder Strom/H<sub>2</sub>O/CO<sub>2</sub> wird weltweit in den nächsten Jahren auch durch entsprechende politische Maßnahmen generiert. Dabei wird allgemein zwischen nachhaltigen Treibstoffen für die Luftfahrt (SAF – Sustainable Aviation Fuels) und Power-to-Liquid-(PtL-)Treibstoffen unterschieden. Mit SAF ist die Gesamtheit der synthetischen Treibstoffe gemeint, welche aus nachhaltigen Rohstoffen (Biomasse bzw. Reststoffe wie auch Strom) hergestellt werden. PtL-Treibstoffe, welche ausgehend von der Elektrolyse von Wasser und der Verwertung von CO<sub>2</sub> hergestellt werden, umfassen strombasierte Treibstoffe und stellen eine Untergruppe der SAF dar. Im erheblichen Maße werden die Beimischungsquoten der Bundesregierung, welche bis 2030 eine Quote von 2 % PtL-Treibstoffen vorsieht, und der EU zu einer Nachfragesteigerung nach synthetischen Kraftstoffen beitragen. Die ReFuelEU Aviation-Initiative [European Parliament 2023] 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.

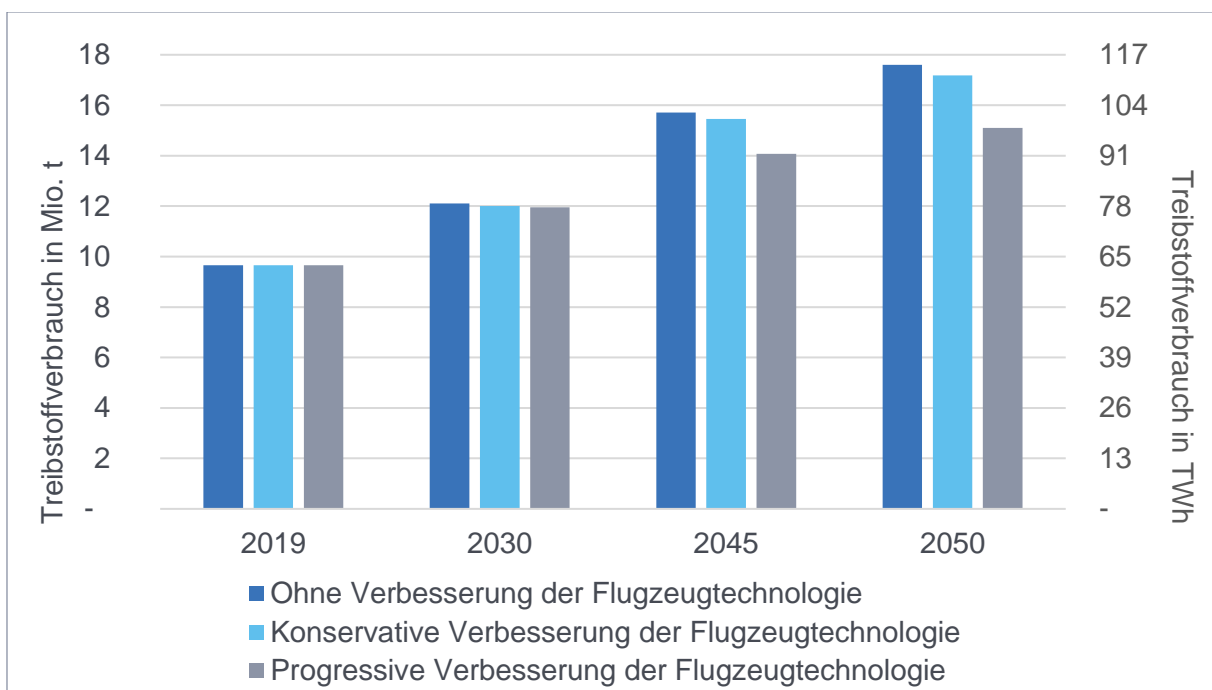
In Deutschland belief sich der Treibstoffverbrauch in 2019 auf 9,7 Mio. Tonnen. Mit dem zu erwartenden Anstieg in der Treibstoffnachfrage (in Abhängigkeit der langfristigen Entwicklung

---

<sup>50</sup> Abgeleitet aus den BEniVer-Szenarien (siehe auch Kapitel 5.6) und [Leipold et al. 2021]

der Flugzeugtechnologie) lässt sich daraus für Deutschland ein Bedarf von etwa 12 Mio. Tonnen in 2030 und von etwa 14,1-15,7 Mio. Tonnen in 2045 bzw. von 15,1-17,6 Mio. Tonnen in 2050 ableiten (siehe Abbildung 10-6). Bei einer geforderten PtL-Quote von 2 % werden 2030 demnach etwa 0,23 Mio. Tonnen an strombasiertem Treibstoff in Deutschland benötigt. Zum Vergleich, dies entspricht in etwa der Menge an SAF, die gegenwärtig insgesamt weltweit eingesetzt wird<sup>51</sup>. Bei vollständiger Umsetzung der Beimischungsquote des Fit-for-55-Pakets (Anwendung auf alle abgehenden Flüge unabhängig vom Zielflughafen) bis 2050 würde in Deutschland, bei angenommener konservativer Technologieentwicklung, eine Nachfrage nach min. 9,5 Mio. Tonnen SAF bestehen, von denen gemäß der PtL-Unterquote etwa 4,2 Mio. Tonnen aus strombasierten Kraftstoffen bestehen müssen.

Als weitere Technologieoptionen zur Realisierung des klimaneutralen Fliegens in der Luftfahrt werden auch der **Einsatz von Wasserstoff als Treibstoff und das elektrische Fliegen** diskutiert. Die direkte Nutzung elektrischen Stroms im Luftverkehr wird aufgrund der Anforderungen und technischen Eigenschaften im Flugzeugbau stark eingeschränkt sein. Die prognostizierte Entwicklung der Energiedichte von Batterien wird voraussichtlich nur eng begrenzte Nischenanwendungen auf sehr kurzen Strecken (Urban Air Mobility und Regionalluftverkehr) ermöglichen. Dies entspricht Flugzeugen mit einer Sitzplatzkapazität von unter 50 Plätzen, deren Reichweite im rein elektrischen Betrieb voraussichtlich auf 500 km begrenzt ist. Der Energieverbrauch dieses Segments im Weltluftverkehr beträgt typischerweise deutlich unter 1 %. Somit wäre kein entscheidender Beitrag zur Reduzierung klimarelevanter Emissionen zu leisten.



**Abbildung 10-6:** Treibstoffverbrauch des Luftverkehrs in Deutschland entsprechend der BEniVer-Szenarien (ohne Berücksichtigung Covid-Effekt)

<sup>51</sup> Weltweit beträgt der Anteil SAF weniger als 0,1 %. 2019, also vor Corona, betrug der globale Treibstoffverbrauch laut IATA 359 Mrd Liter (entspricht ca. 287 Mio. Tonnen). Die absolute Menge an SAF liegt daher bei weniger als 0,29 Mio. Tonnen.

Wasserstoff ist ein vielversprechender Energieträger im Luftverkehr, der jedoch erhebliche Änderungen im Luftverkehrssystem erfordert (Neukonstruktion von Luftfahrzeugen, Umbau der Energieinfrastruktur an Flughäfen, Versorgung der Flughäfen mit Wasserstoff). Aufgrund der, im Vergleich zu flüssigem Kerosin, niedrigen Energiedichte von gasförmigem (komprimiertem) Wasserstoff (5,6 MJ/l vs. 35 MJ/l) wird dieser Energieträger im Luftverkehr voraussichtlich in flüssiger Form (9,1 MJ/l) verwendet werden. Dies ist ein wesentlicher Unterschied zu anderen Nutzern und wird einen erheblichen, zusätzlichen Energiebedarf zur Verflüssigung erfordern. Zum jetzigen Zeitpunkt wird die Markteinführung von neu konstruierten Verkehrsflugzeugen mit Wasserstoffantrieb im Zeitraum 2035-2040 erwartet. Die derzeit diskutierten Flugzeuge umfassen eine Kapazität von bis zu 250 Sitzplätzen und Reichweiten bis zu 2.800 km. Dieses Marktsegment im Bereich der Mittelstrecke hat heute im globalen Luftverkehr einen Anteil von etwa 50 % bei Verkehrsleistung (Personenkilometern) und Energiebedarf. Bei vollständiger Nutzung wasserstoffbetriebener Flugzeuge für den Ersatz außer Dienst gestellter, konventioneller Flugzeuge und zur Abdeckung des Luftverkehrswachstums ab dem Jahr 2040 (Markteintritt dieser Flugzeugklasse) ist zu erwarten, dass im Jahr 2045 etwa 7 % des Energiebedarfs an europäischen Flughäfen abgehender Flüge durch Wasserstoff abgedeckt werden kann. Die Nachfrage nach kohlenwasserstoffbasierten Treibstoffen würde sich dann entsprechend reduzieren.

Auch **andere Energieträger**, die im Straßen- und Schiffsverkehr diskutiert werden (z.B. Methan, Methanol, Flüssiggas, Ammoniak), spielen in derzeitigen Entwicklungen für den Luftverkehr keine Rolle – es sind keine namhaften Flugzeughersteller mit der Entwicklung von Luftfahrzeugen beschäftigt, die diese Energieträger nutzen. In einer Studie von aireg (aviation initiative for renewable energy in germany e.V.) [Bullerdiek et al. 2022] wurde unlängst gezeigt, dass der Einsatz von Gasen und Alkoholen mit einem hohen integrativen und ökonomischen Aufwand verbunden wäre – sowohl was die Umrüstung oder Neukonstruktion der Flugzeuge selbst betrifft als auch hinsichtlich des operativen Ablaufs und der Treibstofflogistik bzw. -infrastruktur. Hinzu kommt der hohe Aufwand für die notwendige Zertifizierung und Zulassung.

Da die volumetrische Energiedichte von verflüssigtem Wasserstoff mit etwa 5,6 MJ/l immer noch deutlich geringer ist, als die von Kohlenwasserstoffen (ca. 35 MJ/l), wird für den Bereich des Interkontinentalverkehrs, der etwa 50% der globalen Energienachfrage im Luftverkehr ausmacht, auch langfristig weiter der Einsatz von kohlenwasserstoffbasierten Treibstoffen notwendig sein. Um die Klimaschutzziele zu erreichen, sind synthetische Kraftstoffe in der Luftfahrt daher unumgänglich. Eine weitere Erhöhung der geforderten Beimischungs-Quoten ist technisch möglich und wird bereits diskutiert. Allerdings ist absehbar, dass die verfügbaren biogenen Rohstoffe zur Bereitstellung entsprechender Mengen an SAF nicht ausreichen werden, sodass ein deutlich höherer Anteil an PtL-Treibstoffen bereitgestellt und eingesetzt werden muss.

### **10.2.2 Besondere Herausforderungen in der Luftfahrt**

Während des Flugbetriebes werden die Emissionen der Luftfahrt bei einer typischen Reiseflughöhe von 9-12 km in Atmosphärenschichten freigesetzt, die vergleichsweise geringe Hintergrundkonzentrationen kurzlebiger Schadstoffe aufweisen. Die Emissionen kurzlebiger Komponenten wie Stickoxide oder Partikel können daher eine vergleichsweise hohe spezifische Klimawirkung entfalten, was den Einsatz nachhaltiger, umweltfreundlicher Treibstoffe umso

wichtiger macht. Derartige Treibstoffe sollten dann auch eine dämpfende Wirkung auf den Klimaeffekt von Kondensstreifen haben. Durch die extrem hohen Sicherheitsanforderungen, die in der Luftfahrt auch ihre Berechtigung haben, ist die Einführung eines neuen Treibstoffes allerdings stark reglementiert, v.a. bzgl. der geforderten Eigenschaften und mit einem sehr hohen finanziellem wie auch zeitlichem Aufwand verbunden.

### **Klimawirkung der Luftfahrt**

Entsprechend der ASTM D7566 ist es in der Luftfahrt gegenwärtig möglich, eine Mischung von 50 % SAF mit konventionellem Jet A-1 einzusetzen. Der Einsatz solch einer Mischung führt bereits zu einer deutlichen Minderung der Emissionen, insbesondere von Rußpartikeln [Voigt et al. 2021], welche eine zentrale Rolle bei der Bildung von Kondensstreifen spielen, da sie als Kondensationskeime für Wasser dienen und somit die Eisbildung einleiten. Aus Kondensstreifen können sich, je nach Wetterlage, großflächige Zirruswolken bilden (Kondensstreifenzirren), welche einen signifikanten Beitrag zur Klimaerwärmung haben, der durch Reduktion der Rußemissionen wirksam gesenkt werden kann [Burkhardt et al. 2018]. Auch die NO<sub>x</sub>-Emissionen haben durch ihren Einfluss auf die atmosphärische Chemie, und der damit verbundenen Änderung der Zusammensetzung der Atmosphäre, einen Anteil am Strahlungsantrieb, v.a. durch die Bildung von Ozon in der Troposphäre und den Abbau von Methan. Zudem werden auch mögliche Effekte von Aerosolpartikeln aus dem Luftverkehr auf Flüssigwasserwolken diskutiert, welche eine kühlende Klimawirkung haben können.

Insgesamt hat die Luftfahrt derzeit einen Anteil von etwa 5 % am gesamten anthropogenem Strahlungsantrieb, wobei die CO<sub>2</sub>-Emissionen etwa zu einem Drittel beitragen [Lee et al. 2021]. Die Mehrheit der Klimawirkung der Luftfahrt entfällt auf die Nicht-CO<sub>2</sub>-Effekte und insbesondere auf die Bildung von Kondensstreifenzirren. Eine nochmals stärkere Reduzierung dieser Effekte könnte mit dem Einsatz eines rein synthetischen, d.h. 100 % SAF, erreicht werden, was auch technisch möglich ist [Airbus 2022b].

### **Anforderung an die Zusammensetzung**

Ein 100 % SAF zeichnet sich v.a. dadurch aus, dass es keine Komponenten aus der Gruppe der Aromaten mehr enthält. Ein Mindestanteil von 8 %<sub>Vol</sub> dieser Stoffklasse ist in der ASTM D7566 derzeit zwingend vorgeschrieben. Als Hauptgrund hierfür gilt das Quellverhalten von Dichtungen bei Kontakt mit dem aromatenhaltigen Treibstoff. Gängige Flugzeuge können dennoch nachweislich auch mit aromatenfreiem SAF betrieben werden. Da aber v.a. Langzeitversuche hier noch fehlen, kann allerdings nicht vollständig ausgeschlossen werden, dass vereinzelt, v.a. bei älteren bzw. schon länger im Dienst befindlichen Flugzeugen, nicht auch ein Austausch von bspw. Dichtungen oder Ventilen erfolgen muss. Dies sind aber Bauteile, die im Rahmen von regulären Wartungsintervallen ohnehin geprüft und bei Bedarf ausgetauscht werden. Die Einführung eines 100 % SAF ohne Aromaten wäre folglich auch nicht (oder nur geringfügig) mit einem Mehraufwand für den Betrieb verbunden.

Die ASTM-Norm D7566 gewährleistet die vollständige Kompatibilität zugelassener synthetischer Treibstoffe mit allen Flugzeugen, unabhängig von dem Alter oder der Ausstattung der Flugzeuge. Wie erwähnt, sind aber bereits Flugzeuge verfügbar, die auch mit einem reinen SAF-Treibstoff betrieben werden können. Um diese in freigegebenen Flugzeugen zu nutzen, ist eine Anpassung bzw. Unterscheidung in den Regularien eine mögliche Option, z.B. wäre

eine Zulassung eines 100 % SAF für nur moderne bzw. explizit durch die Hersteller definierte Flugzeugmodelle denkbar. Dies wäre an den Flughäfen allerdings mit einem erhöhten Aufwand verbunden, bspw. hinsichtlich eines erforderlichen Ausbaus der Tankinfrastruktur, da dann auf die bestehende Infrastruktur zur Treibstoffversorgung nur zum Teil zurückgegriffen werden könnte. Da die Luftfahrtbranche ein überwiegend international agierender Verkehrsbereich ist, in welchem der nationale Transport nur einen Bruchteil ausmacht, ist auch ein international abgestimmtes Vorgehen notwendig.

### **Zertifizierung und Markteinführung**

Auch die Zertifizierung für neue SAF selbst stellt bereits eine recht große Hürde dar, was aus den hohen Sicherheitsanforderungen resultiert, welche in der Luftfahrt notwendig sind. Das Verfahren hierfür ist in der ASTM D4054 geregelt. Es sieht vor, dass neben der Bestimmung spezifischer Treibstoffeigenschaften auch Prüfstands- und Triebwerksversuche bei Flugzeug- bzw. Triebwerksherstellern (OEMs – Original Equipment Manufacturers) durchzuführen sind. Für das Durchlaufen der Test- und Zulassungsverfahren sind daher bereits große Mengen des jeweiligen SAFs erforderlich, was einen hohen wirtschaftlichen Aufwand für den Entwickler bedeutet, bevor sein Produkt überhaupt kommerziell vertrieben werden darf. Hinzu kommt der hohe Zeitaufwand, da zwischen den einzelnen Testphasen die Ergebnisse durch die OEMs und die FAA (Federal Aviation Administration) begutachtet werden müssen.

Von den in BEniVer betrachten, strombasierten SAFs aus dem Fischer-Tropsch- (FT-)Prozess und Methanol-to-Jet- (MtJ-)Verfahren, hat nur das FT-Kerosin als FT-SPK (Synthetic Paraffinic Kerosene) eine Zulassung für die Verwendung in einem 50%-Blend. Für den MtJ-Treibstoff ist dies bislang nicht der Fall.

Als weitere Herausforderung für eine Marktdurchdringung sind v.a. die höheren Treibstoffkosten zu nennen, welche die Airlines auf die Ticketpreise und Transportpreise für Fracht umlegen könnten. Dies könnte die allgemeine Akzeptanz für synthetische Treibstoffe mindern, da u.U. nicht jeder Kunde bereit ist, diese Preiserhöhung zu finanzieren. 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 rasche Markteinführung zu schaffen. 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 [Neste 2023; Brussels 2023] 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 verfliegen wird [Bullerdiek und Quante 2022]. Es zeichnet sich ab, dass allgemein die Produktion von PtL-Kraft- und Treibstoffen in mehreren kleineren Raffinerien stattfinden wird [MPP 2022], was sich auch auf die Treibstoffinfrastruktur bzw. die breite Versorgung der europäischen Flughäfen mit SAF auswirken wird.

#### **10.2.3 Treibstoffoptionen in der Luftfahrt**

Die Anforderungen an die Treibstoffeigenschaften zur Gewährleistung der Kompatibilität lassen nur wenig Spielraum für die Zusammensetzung eines Treibstoffes zu, weswegen es in der Luftfahrt bislang weit weniger Treibstoffoptionen gibt, als dies in anderen Verkehrsbereichen

der Fall ist. Neben dem Einsatz einer Mischung von 50 % SAF mit konventionellem (d.h. fossilem) Jet A-1, sind moderne Flugzeuge nachweislich in der Lage auch 100 % SAF zu verfliegen [Airbus 2022b], jedoch ist die praktische Anwendung aufgrund der fehlenden Zertifizierung gesetzlich nicht erlaubt.

Eine andere Alternative wäre ein 100 % SAF, welches auch synthetische Aromaten enthält. Ein vollsynthetisches Fischer-Tropsch-Kerosin mit Aromaten ist bereits in der ASTM D7566 aufgeführt, sodass dessen Einsatz möglich wäre. Die Minderung der Emissionen, v.a. der Rußpartikelemissionen, wäre im Vergleich zu einem 100 % SAF ohne Aromaten allerdings weniger stark ausgeprägt, aber wohl vergleichbar oder besser, je nach Anteil und Art der Aromaten, als mit einem 50 %-Blend. Einen Vergleich dieser beiden Optionen zeigt Tabelle 10-4.

Je nach Herstellungsprozess werden unterschiedliche SAFs unterschieden. Neben den, im Rahmen von BEniVer, betrachteten strombasierten SAFs aus den FT- und MtJ-Verfahren sind verschiedene biogene SAFs bereits verfügbar (siehe Tabelle 10-5). Gegenwärtig mengenmäßig am bedeutendsten ist das HEFA-Kerosin (Hydrogenated Esters and Fatty Acids), welches überwiegend aus gebrauchten Speiseölen und -fetten hergestellt wird. Daneben werden bereits auch Treibstoffe auf Basis der Alkohole Ethanol und Isobutanol (AtJ-SPK – Alcohol to Jet SPK) in nennenswerten Mengen produziert. Die Alkohole selbst werden v.a. aus nicht anderweitig verwertbaren Pflanzenbestandteilen hergestellt, aber auch Hausmüll oder Industrieabgase können als Rohstoffe dienen.

**Tabelle 10-4:** Übersicht zur Bewertung der Treibstoffoptionen in der Luftfahrt<sup>52</sup>  
 (😊 vorteilhaft, 😐 unvorteilhaft, 😞 nachteilig)

	Blend mit 50 % <sub>vol</sub> SAF	100 % SAF
<b>Treibstoffherstellung</b>	😞 Aufwändige Herstellung 😞 Entstehung von Nebenprodukten	😞 Aufwändige Herstellung 😞 Entstehung von Nebenprodukten
<b>Infrastrukturverfügbarkeit</b>	😊 Vorhandene Infrastruktur kann aus technischer Sicht genutzt werden 😐 Offen, ob uneingeschränkte Nutzung möglich, v.a. wegen Kosten	😊 Vorhandene Infrastruktur kann aus technischer Sicht genutzt werden 😐 Offen, ob uneingeschränkte Nutzung möglich, v.a. wegen Kosten → evtl. parallele Infrastruktur an Flughäfen notwendig
<b>Anwendbarkeit (Drop-In / Blend / Triebwerksanpassung)</b>	😊 Erfüllt ASTM D7566 → vollständig kompatibel mit Bestandsflotte 😞 Höhere Treibstoffkosten	😊 Aus technischer Sicht kompatibel 😊 Effizientere Verbrennung 😊 Falls Austausch von Dichtungen, Ventilen etc. erforderlich, kann dies im Rahmen von regulärer Wartung erfolgen 😐 Evtl. öfter Inspektion/Wartung notwendig wg. Materialverträglichkeit 😞 Keine ASTM-Zulassung 😞 Höhere Treibstoffkosten
<b>Schadstoff-Emissionen</b>	😐 Minderung der Emissionen im Vgl. zu reinem, fossilem Kerosin	😊 Deutlich stärkere Emissionsminderung, einschließlich der Nicht-CO <sub>2</sub> -Effekte
<b>F&amp;E-Bedarfe</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Logistik und Handhabung großer Mengen SAF unterschiedlicher Herkunft</li> <li>• Verfügbarkeit von Rohstoffquellen für biogene SAF</li> <li>• „Fuel-Design“</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Logistik und Handhabung großer Mengen SAF unterschiedlicher Herkunft</li> <li>• Verfügbarkeit von Rohstoffquellen für biogene SAF</li> <li>• „Fuel-Design“</li> </ul>
<b>Begleitete EiV-Forschungsvorhaben</b>	KEROSyN100 PowerFuel	

<sup>52</sup> Die hier aufgeführten Treibstoffoptionen beziehen sich auf generische Kraftstoffpfade und stellen eine Auswahl der von den begleiteten EiV-Forschungsvorhaben beforschten Treibstoffe dar.



**Tabelle 10-5:** Zertifizierte Treibstoffe nach ASTM D7566 [CAAFI 2022] (Reihenfolge entspricht der Auflistung im Anhang der ASTM D7566); \*Erweiterung laut ASTM D7566 möglich

Name	max. Beimischungsanteil	zugelassener Rohstoff / Ausgangsmaterial
Fischer-Tropsch Synthetic Paraffinic Kerosene (FT-SPK)	50 %	Synthesegas (CO + H <sub>2</sub> ), Herkunft variabel
Hydroprocessed Esters and Fatty Acids Synthetic Paraffinic Kerosene (HEFA-SPK)	50 %	Fettsäuren und Fettsäureester aus Pflanzenölen und tierischen Fetten
Hydroprocessed Fermented Sugars to Synthetic Isoparaffins (HFS-SIP, auch: Farnesan)	10 %	Zucker, Stärke, Lignocelullose
Fischer-Tropsch Synthetic Paraffinic Kerosene with Aromatics (FT-SPK/A)	50 %	Synthesegas (CO + H <sub>2</sub> ), Herkunft variabel
Alcohol to Jet Synthetic Paraffinic Kerosene (ATJ-SPK)	50 %	Fermentativ oder biochemisch gewonnenes Ethanol oder Isobutanol*
Catalytic Hydrothermolysis Synthesized Kerosene (CH-SK oder CHJ)	50 %	Fettsäuren und Fettsäureester aus Pflanzenölen und tierischen Fetten
Hydroprocessed Hydrocarbons, Esters and Fatty Acids Synthetic Paraffinic Kerosene (HHC-SPK oder HC-HEFA-SPK)	50 %	aus bestimmter Alge hergestellte Kohlenwasserstoffe, Fettsäureester und Fettsäuren*

#### **10.2.4 Forschungs- und Entwicklungsbedarfe bei der Treibstoffnutzung in der Luftfahrt**

Um den Bedarf an weiteren Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten abzuschätzen, wurden auf der BEniVer Statuskonferenz am 1. Juli 2022 mehrere Workshops abgehalten, bei welchen die Beteiligten der Förderinitiative „Energiewende im Verkehr“ zu diesem Thema ihren Input liefern konnten. Der Input dieser Workshops wurde für die Ermittlung des Forschungs- und Entwicklungsbedarfs berücksichtigt.

#### **Übergeordnete Forschungsbedarfe**

Für die Luftfahrt stehen bereits verschiedene synthetische Kraftstoffe bereit, die momentan noch auf unterschiedlichen biogenen Syntheserouten beruhen. Über kurz oder lang werden

die strombasierten Kraftstoffe allerdings hinzukommen. Abgesehen von der isolierten Betrachtung der einzelnen biogenen und strombasierten Treibstoffe, stellt sich daher die Frage nach der Einsatzfähigkeit einer **Mischung aus mehreren unterschiedlichen SAF**. Für eine flächendeckende Versorgung mit synthetischen Treibstoffen werden alle Arten – biogen wie strombasiert – benötigt werden. Um für deren Bereitstellung den Aufwand in der Treibstofflogistik und der Infrastruktur an den Flughäfen so gering wie möglich zu halten, wird es nicht zu vermeiden sein, verschiedene synthetische Treibstoffe in größeren Mengen miteinander zu mischen. In kleinerem Maßstab gab es bereits erste Untersuchungen zum Verhalten und der Verträglichkeit sogenannter „Multiblends“ [Bullerdiek et al. 2019], deren Ergebnisse erkennen lassen, dass ein Multiblend wie ein einzelner synthetischer Treibstoff handhabbar ist. Für eine abschließende Beurteilung sind einzelne Studien zwar wichtige Mosaiksteine, aber nicht hin- und ausreichend – hier besteht weiterer Forschungsbedarf. Dabei sollte die Handhabung von größeren Mengen ebenso im Fokus stehen, wie Langzeitstudien über einen Zeitraum von etlichen Monaten bis sogar hin zu Jahren.

Neben den technischen Aspekten, die in der Anwendung der Treibstoffe v.a. deren Zusammensetzung und Eigenschaften betreffen, gibt es auch einige **regulatorische Fragestellungen**, die geklärt werden müssen. Hier ist zum einen die Ausarbeitung einer Norm für die Zulassung und Nutzung (Zertifizierung) eines 100 % SAF erforderlich. Hierfür sind entsprechende technische Studien, inklusive Flugkampagnen, unabdingbar. Zum anderen müssen auch international gültige Rahmenbedingungen geschaffen werden, die eine Markteinführung zu konkurrenzfähigen Preisen ermöglicht. In Ergänzung zu den im Kapitel 10.1.4.2 beschriebenen generellen, systemanalytischen Forschungsbedarfen, ergeben sich für die Luftfahrt noch weitere spezifische, **gesamtsystemische Forschungsbedarfe**:

- Erforschung und Umsetzung von **Effizienz- und Vermeidungspotenzialen** in allen Bereichen der Luftfahrt, um den Bedarf an Kerosin jedweder Herkunft grundsätzlich zu minimieren.
- Umfassende Entwicklung und Erforschung aller **Substitutionsmöglichkeiten fossilen Kerosins**, auch im Rahmen der Antriebswahl bei Flugzeugen.
- Erarbeitung regulatorischer Rahmenbedingungen für die Entwicklung dieser Alternativen.
- Zeitlich gestaffelte **Priorisierung innerhalb der Luftfahrtbranche** selbst, wo synthetisches Kerosin zur Defossilisierung benötigt wird; dementsprechend sollten für weniger dringliche Bereiche auch entsprechende bzw. regulatorische Maßnahmen bzgl. einer gezielten Nutzung für die priorisierten Nutzungen untersucht werden.
- Untersuchung der **nicht-CO<sub>2</sub>-basierten Treibhausgaseffekte** der Luftfahrt, auch bei einer Umstellung auf synthetisches Kerosin.

### **Treibstoffspezifische Forschungsbedarfe**

Als nachhaltige synthetische Treibstoffe (SAF) für die Luftfahrt, lassen sich grundlegend zwei Arten unterscheiden: strombasierte und biogene. Bei **biogenen Treibstoffen** besteht der Forschungsbedarf v.a. in der Verfügbarmachung geeigneter Rohstoffe bzw. Quellen und dem Entwickeln fortschrittlicher Biotreibstoffe. Die Struktur und die Kettenlänge der biobasierten Treibstoffe sind oftmals durch die verwendeten organischen Ausgangsmaterialien bestimmt.

So weist ein HEFA-Kerosin, welches aus Fettsäuren bzw. Fettsäureestern hergestellt wird, überwiegend lineare Ketten auf, während ein AtJ-SPK überwiegend aus mehrfach verzweigten C<sub>12</sub>- und C<sub>16</sub>-Molekülen besteht, da für dessen Herstellung iso-Butanol als Edukt verwendet wird. Die Unterschiede in der Struktur wirken sich auch entsprechend auf die Eigenschaften des synthetischen Treibstoffs aus.

**Strombasierte Treibstoffe** eröffnen aufgrund des Syntheseprozesses die Möglichkeit, einen Treibstoff gezielt, d. h. mit genau vorhersagbaren Eigenschaften, zu designen. So kann – entsprechend der gewünschten Eigenschaften – die Kettenlänge sowie Struktur der Treibstoffmoleküle vorgegeben und gezielt synthetisiert werden, wie z.B. (mehrfach) verzweigte Moleküle oder auch Aromaten. Die gezielte Synthese ist dabei grundlegend für beide gegenwärtig bekannten Verfahren möglich, d.h. für den Fischer-Tropsch Prozess, wie auch für den Methanol-to-Jet-Prozess. Da der Fischer-Tropsch-Prozess wesentlich besser bekannt ist, bieten sich hier bereits heute mehr Möglichkeiten für die Herstellung von nachhaltigen, synthetischen Treibstoffen.

Für das zuvor genannte „**Fuel-Design**“ von synthetischen, insbesondere von strombasierten Treibstoffen, sind bereits Grundlagen gelegt. Die Umsetzung benötigt sowohl weitergehende Grundlagenforschung zum Verständnis der Verbrennungsschemie und der Schadstoffbildung, einschließlich der Nicht-CO<sub>2</sub>-Effekte, als auch weitere Entwicklung der Syntheseverfahren, um die optimale Syntheseroute für den (optimalen) „Wunsch“-Treibstoff zu finden. Die Technik des „Fuel-Designs“ ermöglicht nicht nur die Anpassung der Treibstoffzusammensetzung an die gewünschten (Ziel)-Eigenschaften, sondern auch eine Reduktion der CO<sub>2</sub>-Emissionen und der Nicht-CO<sub>2</sub>-Effekte, insbesondere der Rußeffekte in der Kondensstreifenbildung, was die Klimawirkung weiter reduziert. Für eine gleichzeitig schadstoffärmere und effizientere Verbrennung ist die gemeinsame Weiterentwicklung von Treibstoff und Triebwerk(en) eine vielversprechende Strategie. Die Weiterentwicklung des „Fuel-Designs“ kann zukünftig auch eine solche Co-Optimierung der Anwendung des Treibstoffes und dessen Herstellung ermöglichen. So können hinsichtlich der Anwendung die Verbrennungseigenschaften optimiert werden, während in Bezug auf die Herstellung vor allem die Nebenprodukte reduziert bzw. an den Bedarf anderer Verkehrsbereiche (z.B. Schifffahrt) angepasst werden können. Diese Strategie erlaubt eine spürbar erhöhte Wirtschaftlichkeit in der Herstellung und Anwendung der nachhaltigen, synthetischen Treibstoffe (SAF) für die Luftfahrt.

Darüber hinaus sind auch der **Einsatz von Wasserstoff und elektrisch betriebenen Flugzeugen** für den Kurz- und Mittelstreckenbereich mögliche Optionen. Auch wenn Industrieunternehmen, wie z.B. Airbus [Airbus 2022a, 2022c] bereits in die Entwicklung eingestiegen sind, ist noch viel Forschungs- und Entwicklungsarbeit notwendig, bis diese Technologien eine entsprechende Marktreife erlangt haben, sodass sie auch in der kommerziellen Luftfahrt eingesetzt werden können.

### **10.2.5 Markthochlauf**

Für den Luftverkehrsbereich geht der Markthochlauf synthetischer Kraftstoffe mit einer Reihe von Herausforderungen einher. Hierzu gehört die **effektive Limitierung nicht-CO<sub>2</sub>-bedingter Treibhausgasemissionen**. Letztere fallen absehbar durch synthetische Kraftstoffe nicht weg. Hier bedarf es weiterer Forschung, damit synthetische Kraftstoffe effektiv zum Klimaschutz

beitragen können. Zugleich sollten diese Nicht-CO<sub>2</sub>-Emissionen politisch unmittelbar adressiert werden, etwa durch die Festlegung von sukzessive ansteigenden Emissionsobergrenzen oder eine Bepreisung / Besteuerung dieser Emissionen sowie die Unterstützung des Modal Shifts auf der Kurz- und Mittelstrecke [IPCC 2022].

Von hoher Bedeutung ist auch, dass bei der Produktion synthetischen Kerosins – je nachdem, wie hoch der Anteil an Kerosin im jeweiligen Herstellungsprozess sein wird, ggf. bedeutende Mengen an Koppelprodukten anfallen. Dementsprechend braucht es die politische Förderung von **Produktionsprozessen, die explizit auf die zu priorisierenden Bereiche (Luft-, Schiffverkehr und Industrie) ausgerichtet** sind. Die Herausforderung besteht in einem **ressourcenschonenden Mitteleinsatz**, der die Elektrifizierung in anderen Sektoren (insb. im bodengebundenen Verkehr) nicht behindert. Nicht-monetäre Instrumente wie Herkunftsnachweise, könnten hier ein wirkungsvoller Ansatz sein. Eine Beimischungsquote kann eine ergänzende Maßnahme sein; diese könnte über eine novellierte BISMchV, die die Priorisierung auf die wichtigsten Sektoren umsetzt, geleistet werden.

Auch die Finanzierung dieser Maßnahmen und die Höhe der Kraftstoffpreise stellen Herausforderungen bei der Markteinführung dar. Mit Preisanstiegen ist bei der Markteinführung synthetischer Kraftstoffe zu rechnen. Die Auswirkungen auf die Produktpreise dürften aufgrund des anteilig geringen Frachtvolumens des Luftverkehrs eher begrenzt sein. Im Personentransport könnten sich allerdings Verteilungsfragen verschärfen.

#### **10.2.6 Regulatorische Anforderungen**

Im Bereich der Luftfahrt existieren bereits erste Mechanismen, die hinsichtlich der Markteinführung synthetischer Kraftstoffe zu berücksichtigen sind. So gilt es zu beachten, dass der Flugverkehr seit 2012 Teil des EU-ETS ist. Auf internationaler Ebene befindet sich CORSIA in seiner Pilotphase, innerhalb derer alternative Kraftstoffe berücksichtigt werden können. Der Anreiz, dies zu tun, fällt jedoch gering aus [Capaz et al. 2021]. Eine nennenswerte Wirkung von CORSIA selbst wird nicht erwartet [IPCC 2022].

Neben dem EU-ETS, das eine Marktdurchdringung synthetischer Kraftstoffe potenziell stützen könnte, bestehen Regelungen fort, die sich dabei als Hindernisse erweisen können. In diesem Zusammenhang ist insbesondere das Chicagoer Abkommen von 1944 zu nennen, mit dem die ICAO für Kerosin eine fortdauernde Ausnahme von der Besteuerung erwirken konnte. In vielen Punkten könnte mittels weiterer internationaler Rahmenabkommen (innerhalb eines verschärften CORSIA-Mechanismus oder durch Abkommen mit weiteren Vorreiterstaaten) die Reduktion der THG-Intensität des Luftverkehrs beschleunigt werden: Hier könnte im **Verbund mit der EU die gemeinsame Besteuerung von THG-Emissionen aus der Luftfahrt angegangen werden**. Aufgrund der international fixierten (THG-)Steuerbefreiung der Luftfahrt erweist sich auch die Gegenfinanzierung von Fördermaßnahmen der Produktion synthetischen Kerosins als schwierig. Alternativ wäre zu erwägen, ob die Luftfahrtbranche verpflichtet werden sollte, notwendige Infrastrukturanpassungen selbst zu errichten bzw. zu finanzieren.

Daneben soll in der Bundesrepublik die Luftverkehrsabgabe für die Förderung synthetischer Kraftstoffe umgewidmet werden [Koalitionsvertrag 2021]. Der in der PtL-Roadmap angedachten PtL-Quote soll zudem mittels einer verpflichtenden Abnahme von 200.000 Tonnen PtL-

Treibstoffen durch die Luftfahrtbranche bis 2030 entsprochen werden [Bundesregierung 2021b]. Auf EU-Ebene wiederum wird im Rahmen des „Fit-for 55-Pakets“ eine ähnliche Regelung vorbereitet. Neben einer EU-weiten Infrastruktur für „alternative Treibstoffe“ beinhaltet diese eine Vorgabe, wonach bis 2030 wenigstens 6 % der Flugtreibstoffe nachhaltig sein müssen [European Council 2022]. Allerdings befinden sich die Gesetzestexte auf Bundes- wie auf EU-Ebene noch in der Bearbeitung. Dabei sollte darauf geachtet werden, dass jeweils entsprechende Sanktionsmaßnahmen bei der Nichtbeachtung eingeführt und durchgesetzt werden.

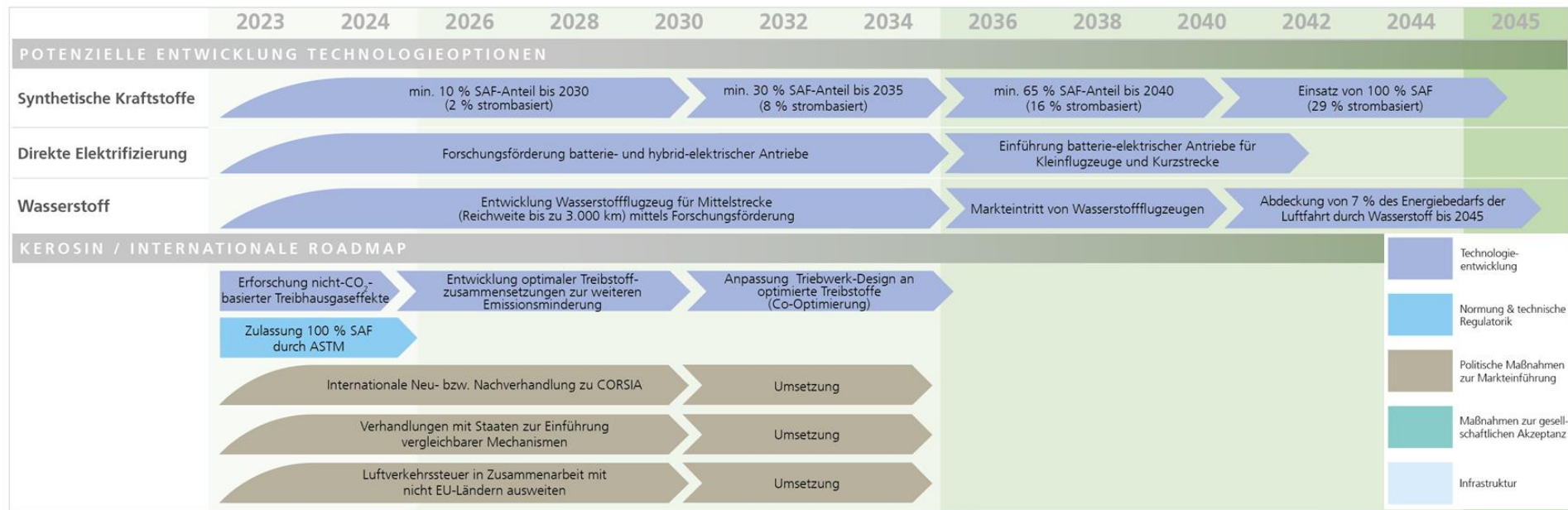
### **10.2.7 Gesellschaftliche Akzeptanz**

Die Akzeptanzuntersuchungen zeigen, dass der Luftverkehr von nahezu allen Akteursgruppen als prioritäres Einsatzfeld für synthetische Kraftstoffe betrachtet wird, da für die meisten Anwendungsbereiche in diesem Verkehrsbereich auf absehbare Zeit keine ausgereiften alternativen Antriebstechnologien zur Verfügung stehen. Folglich werden politische Maßnahmen zur Förderung des Einsatzes synthetischer Kraftstoffe überwiegend unterstützt (z.B. Quoten für die SAF-Nutzung), teilweise werden aktuelle bzw. konkret in Planung befindliche Quoten sogar als zu wenig ambitioniert betrachtet. Fraglich erscheinen vielen Akteuren jedoch die Chancen eines ausreichend schnellen Aufbaus entsprechender Produktionskapazitäten zur Herstellung der erforderlichen Mengen synthetischer Kraftstoffe. Hier werden verstärkte Bemühungen der Politik erwartet, die durch geeignete Rahmensetzungen Investitionen in PtX-Anlagen anregen könnte.

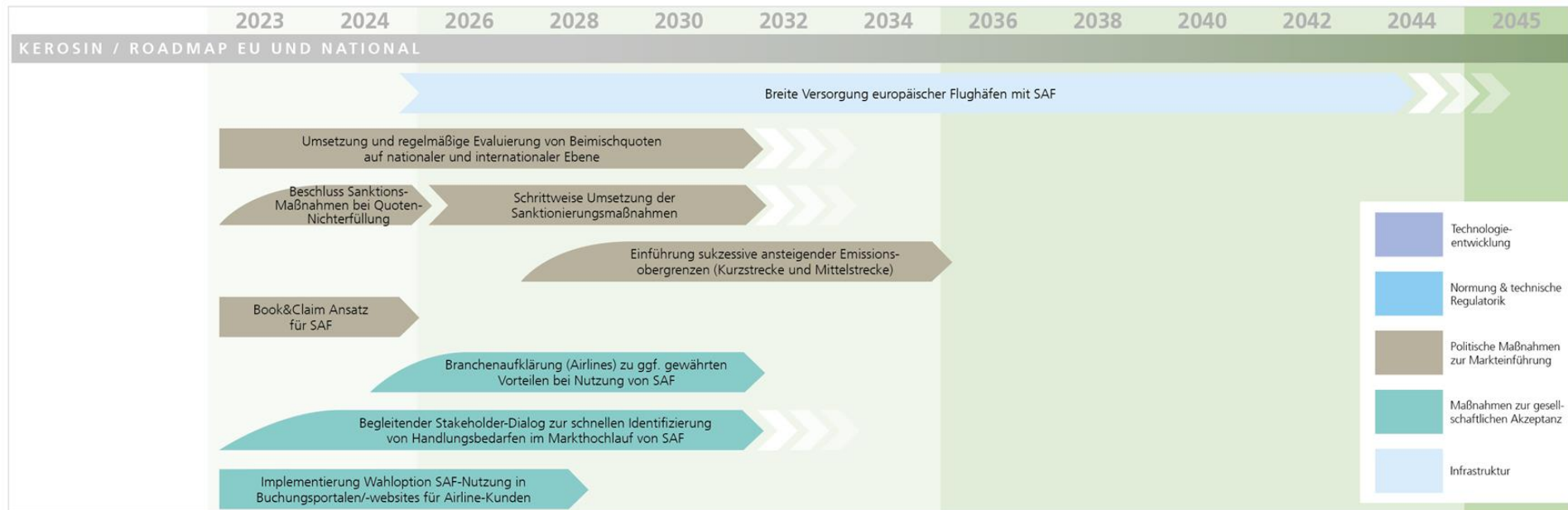
In internationalen Organisationen und Gremien, die für Regulatorik und Richtlinien im globalen Luftverkehr maßgebend sind (z.B. ICAO) sollten sich Deutschland und die EU nach Ansicht vieler Akteure für verstärkte Klimaschutzanstrengungen unter fairen wettbewerblichen Bedingungen („level playing field“) einsetzen. Innerhalb der EU werden schnellere und besser aufeinander abgestimmte Entscheidungen gefordert, z.B. bzgl. Fragen zu Standards / Vorgaben für die SAF-Herstellung, Anrechenbarkeiten der mit einer SAF-Nutzung verbundenen THG-Einsparungen etc. Verzögerungen bei der Verabschiedung gemeinsamer EU-Regularien befördern nach Meinung mancher Akteure zwischenzeitliche nationalstaatliche Alleingänge, welche zu weiterer Verunsicherung und Investitionszurückhaltung führen können.

Um die Markteinführung synthetischer Kraftstoffe zu unterstützen, wünschen sich einige Akteure Maßnahmen, die auf der Nachfrageseite wirksam werden, wie z.B. das Vermindern der Preis-Schere zwischen fossilem und synthetischem Kerosin oder ein „Book & Claim“-System, das es ermöglicht, die durch eine SAF-Nutzung bewirkte THG-Reduktion vom physischen Produkt zu „entkoppeln“ und sie separat in Form registrierter Zertifikate zu handeln.

**10.2.8 Roadmap für SAF in der Luftfahrt**



**Abbildung 10-7:** Roadmap in der Luftfahrt – Entwicklung Technologieoptionen und Internationale Roadmap für den Einsatz von SAF



**Abbildung 10-8:** Roadmap in der Luftfahrt – Europäische und Nationale Roadmap für den Einsatz von SAF

## 10.3 Schifffahrt

### 10.3.1 Potenziale von synthetischen Kraftstoffen in der Schifffahrt

Weltweit beträgt der Kraftstoffverbrauch der Schifffahrt in etwa 350 Mio. Tonnen [Heumer 2022]. Für Deutschland lag der Kraftstoffverbrauch der Schifffahrt in 2019 zwar nur bei etwa 1,6 Mio. Tonnen [BMDV 2021], allerdings ist die nationale Zuordnung des Verbrauches nicht immer eindeutig. Mit der Emission von 1.056 Mio. Tonnen CO<sub>2</sub> (in 2018) hat die gesamte globale Schifffahrt einen Anteil von 2,9 % an der Gesamtheit der weltweiten CO<sub>2</sub>-Emissionen. Davon entfallen mit 919 Mio. Tonnen CO<sub>2</sub> etwa 87 % auf die internationale Schifffahrt, was 2,5 % des gesamten CO<sub>2</sub>-Ausstoßes entspricht [IMO 2021]. Hinsichtlich des Kraftstoffverbrauchs und der CO<sub>2</sub>-Emissionen liegt die Schifffahrt damit etwas oberhalb der Umweltwirkung der Luftfahrt.

Die Mehrheit der heute eingesetzten Schiffe wird mit Schiffsdiesel (Marine Gas Oil / MGO) und Schweröl (Heavy Fuel Oil / HFO) angetrieben. Zudem gibt es unterschiedliche Mischungen der beiden Kraftstoffe. In 2018 belief sich der Anteil dieser Kraftstoffe am gesamten Verbrauch in der Schifffahrt auf etwa 97 %, wobei allein das HFO einen Anteil von 79 % hatte [IMO 2021].

Um den zukünftigen Bedarf zu decken, zeichnet es sich ab, dass die Antriebskonzepte in der Schifffahrt diverser werden, d.h. für unterschiedliche Anwendungsbereiche wird es unterschiedliche Antriebskonzepte geben, die sich über verschiedene Optionen erstrecken. Der Einsatz von **drop-in-fähigen synthetischen Kraftstoffen** nimmt dabei eine entscheidende Rolle ein, da nur mit diesen die direkte Weiternutzung der vorhandenen Schiffe möglich ist, welche in der Hochseeschifffahrt eine Lebensdauer von tlw. deutlich über 30 Jahren erreichen können.

Aus technischer Sicht kann mit synthetischem Diesel aus dem Fischer-Tropsch- (FT-) Prozess die komplette Bandbreite an flüssigen Schifffahrtskraftstoffen ersetzt werden. Schon allein mit der Verwendung von FT-Diesel können die Schadstoffemissionen, v.a. hinsichtlich der Rußemissionen, deutlich reduziert werden, SO<sub>x</sub>-Emissionen würden gänzlich vermieden werden. Mit Methanol und synthetischem LNG (Liquefied Natural Gas) gibt es zwei weitere strombasierte Kraftstoffe, die in bereits bestehenden und erprobten Antriebskonzepten verwendet werden können. Während LNG-Schiffe bereits seit mehreren Jahren eingesetzt werden, sind mit Methanol betriebene Schiffe erst in den letzten Jahren auf den Markt gekommen.

**Weitere Optionen** und Möglichkeiten zur Minderung von Schadstoffemissionen bieten die Nutzung von weiteren oxygenierten Kraftstoffen, der Einsatz von Wasserstoff oder Ammoniak als Kraftstoff sowie der direkt elektrische Betrieb. Rein elektrisch betriebene Schiffe werden für kurze Strecken (kleiner etwa 100 nautische Meilen) in der Binnenschifffahrt, wie Fähren oder Ausflugsboote bereits vereinzelt eingesetzt, vor allem in Skandinavien. Sie haben jedoch für die maritime Schifffahrt mangels Kapazität bzw. Reichweite kein Potenzial, auch langfristig gesehen.



### **10.3.2 Besondere Herausforderungen in der Schifffahrt**

Über 87 % der CO<sub>2</sub>-Emissionen, die durch die Schifffahrt verursacht werden, entfallen auf die internationale Schifffahrt [IMO 2021]. Die Minderung der Treibhausgasemissionen zu Reduzierung der Klimawirkung der Schifffahrt erfordert daher eine international abgestimmte Vorgehensweise bei der Einführung synthetischer Kraftstoffe. Es bedarf einheitlicher Regularien, wie auch einem weltweiten Ausbau der Infrastruktur für die Kraftstoffversorgung der Häfen, um eine möglichst hohe Vielzahl verschiedener, synthetischer Schifffahrtskraftstoffe auch global nutzbar zu machen. Da für den Warentransport die maritime Schifffahrt von zentraler Bedeutung ist, zeichnet es sich ab, dass in diesem Bereich auch eine optimierte Logistik und Routenplanung notwendig sein wird.

#### **Hafeninfrastruktur und Logistik**

Eine zentrale Herausforderung für die Anwendung der unterschiedlichen Kraftstoffe ist die Infrastruktur und insbesondere die flächendeckende Versorgung der Häfen. Werden unterschiedliche Kraftstoffe eingesetzt, müssen diese auch alle verschiedenen Kraftstoffe entsprechend bevorraten. Während für synthetischen Diesel und synthetisches LNG auf die bestehende Tankinfrastruktur zurückgegriffen werden kann, ist diese an den Häfen für Methanol, Wasserstoff und Ammoniak bislang nicht vorhanden. Da diese drei Stoffe Grundchemikalien der Chemieindustrie sind, ist eine Verteilungsinfrastruktur grundlegend vorhanden, diese müsste aber ausgebaut werden, um den Bedarf für die Schifffahrt zu decken.

Für Frachtschiffe wird eine optimierte Logistik und Neuverteilung der Ladung notwendig werden, da die meisten synthetischen Kraftstoffe einen größeren Platzbedarf aufgrund ihrer geringeren Energiedichte einnehmen. Bei gleichbleibender Schiffsgröße verringert sich dadurch der Raum für die Ladung, mit entsprechenden etwaigen ökonomischen Nachteilen. Andererseits kann der Frachter am Hafen dann schneller gelöscht werden, sodass das Frachtschiff weniger Standzeit hat und entsprechend mehr Zeit auf See verbringen kann. Auch eine Auslegung des Schiffes auf kürzere Routen könnte dem Nachteil der geringeren Energiedichte entgegenwirken.

#### **Nutzungskonkurrenz und Synergien**

Die in der Schifffahrt diskutierten Kraftstoffe stehen alle auch einer Nutzungskonkurrenz zu anderen Verkehrsbereichen und auch Sektoren (v.a. Energie und Chemie) gegenüber. Am wenigsten davon betroffen ist der synthetische Diesel, der ähnliche Kettenlängen wie Kerosin für die Luftfahrt hat. Hier lassen sich Fischer-Tropsch-Verfahren gezielt so steuern, dass die Ausbeute entweder an Kerosin oder Dieselkraftstoff erhöht werden kann. Des Weiteren besteht der in der Schifffahrt genutzte Dieselkraftstoff aus durchschnittlich höheren Kohlenwasserstoffen, d.h. längeren C-Ketten, die im Raffinerieprozess parallel zum synthetischen Kerosin erzeugt werden können. Bis zu einem gewissen Grad können beide Kraftstoffe daher auch in Synergie hergestellt werden. Bei synthetischem LNG ist die Konkurrenz zur Energieversorgung ein wichtiges Kriterium. Für Methanol, Ammoniak und Wasserstoff ergibt sich eine Konkurrenz zur Chemieindustrie, die alle drei Stoffe als Grundchemikalie benötigt. Für Ammoniak ist dies insbesondere der Bereich der Düngemittelindustrie und für Wasserstoff, neben dem Bedarfs als Hydrierungsmittel, die Möglichkeit der Umsetzung in andere synthetische Kraft-

stoffe. Mit optimierten Produktionsverfahren sowie einer effizienten Logistik und Verteilungsinfrastruktur besteht aber auch das Potenzial, dass die angesprochenen Nutzungskonkurrenzen auch in Synergieeffekte übergehen können.

### Regularien und Markteinführung

Wie auch in anderen Bereichen besteht eine zentrale Herausforderung für eine erfolgreiche Markteinführung in der Kompensation der höheren Kraftstoffkosten. 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 „FuelEUMaritime“ [EU 2021/0210] sieht bislang zwar Ziele zur Minderung von Treibhausgasemissionen vor. Konkrete Quoten für synthetische Kraftstoffe sind hier bislang nicht enthalten, es gibt aber Bestrebungen, welche zu ergänzen.

Wie oben bereits erwähnt, sind 87 % der CO<sub>2</sub>-Emissionen der Schifffahrt auf internationale Routen bzw. Fahrten zurückzuführen. Von entsprechender Bedeutung sind daher international abgestimmte und von allen Ländern akzeptierte Regularien. Hierfür ist v.a. die Arbeit der IMO (International Maritime Organization) entscheidend, welche in 2018 eine Strategie zur Reduzierung der Treibhausgasemissionen verabschiedet hat [IMO 2018].

Insgesamt gibt es in der Schifffahrt ein großes Interesse und Bestrebungen, über die bereits definierten Ziele hinaus, auf alternative Antriebe und Kraftstoffe umzusteigen. Neben der Einführung von Schiffen mit entsprechenden Antriebssystemen ist dazu auch die Umrüstung von bestehenden HFO- bzw. MGO-Schiffen notwendig. Diese ist allerdings mit hohen Kosten verbunden. Selbst der Umbau eines, vergleichsweise kleinen Containerschiffs auf LNG nimmt bereits einen zweistelligen Millionenbetrag in Anspruch. Sofern es sich nicht bereits um ein LNG-Bunkerschiff handelt oder der Betreiber günstiges LNG zur Verfügung hat, ist eine Umrüstung ohne finanzielle Förderung für viele Betreiber oder Schiffseigner nicht lukrativ. Eine Förderung darf sich dabei nicht nur auf nationale Unternehmen beschränken, da Schiffseigentümer und Betreiber bzw. Reederei oftmals nicht identisch sind und unterschiedlichen Nationen angehören.

#### **10.3.3 Kraftstoffoptionen in der Schifffahrt**

In der Schifffahrt ist derzeit noch keine verlässliche Festlegung auf den oder die zukünftig optimalen Kraftstoff(e) möglich. Langfristig zeichnet sich **Methanol** als synthetischer 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. **Fischer Tropisch (FT)-Diesel** oder synthetisches **LNG** (Liquified Natural Gas), 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**. Nachfolgend sind die verschiedenen Kraftstoffoptionen näher beschrieben, einen Überblick gibt Tabelle 10-6 am Ende dieses Kapitels.

Für **Methanol** sind bislang zwar nur einzelne Anwendungen bekannt, jedoch gibt es hier einen wachsenden Markt mit Global Playern wie bspw. der Reederei Maersk und dem Schiffsbauer Hyundai [Collins 2022]. Die Energiedichte (15,7 MJ/l bzw. 20 MJ/kg) ist zwar nur etwa halb so groß wie die von Schiffsdiesel (36 MJ/l bzw. 40 MJ/kg), weswegen für die gleiche Fahrtstrecke ein größerer Tank erforderlich ist. Das Emissionsminderungspotenzial ist allerdings so groß, dass sogar die Möglichkeit besteht, auf eine Abgasnachbehandlung verzichten zu können, mit dem Vorteil einer Kosteneinsparung. Aufgrund der geringen Emissionen, ist Methanol auch in allen Bereichen der Schifffahrt einsetzbar, d.h. für die Hochseeschifffahrt, in Küstenregionen und auf Flüssen. Neben der motorischen Anwendung besteht mit Methanol auch die Möglichkeit, Brennstoffzellen-betriebene Schiffe anzutreiben. Für eine flächendeckende Anwendung müsste die bestehende Methanolinfrastruktur an den Häfen allerdings ausgebaut werden.

Da Methanol nur bedingt in bestehenden Schiffen eingesetzt werden kann, sind kurzfristig Drop-In-Kraftstoffe notwendig. Wie bereits erwähnt, bietet hier **FT-Diesel** die Möglichkeit, sowohl den konventionellen Schiffsdiesel als auch das immer noch häufig verwendete Schweröl sowie Mischungen aus beiden Kraftstoffen zu ersetzen. Neben FT-Diesel eignet sich für den Einsatz auch jeder andere paraffinische Dieselkraftstoff, wie z.B. ein aus der Hydrierung von gebrauchten Speiseölen und -fetten gewonnener HEFA-Diesel (Hydrogenated Esters and Fatty Acids). Schiffe, die auf den Betrieb mit reinem MGO abgestimmt sind, können wesentlich besser auf die Nutzung von synthetischem Diesel umgestellt werden als solche, die mit reinem HFO bzw. HFO-MGO-Mischungen (mit hohem HFO-Anteil) betrieben werden. Hier ist sehr wahrscheinlich eine Anpassung an die Motorsteuerung erforderlich. Auch ist synthetischer Diesel für die Schifffahrt besser in den Bestand integrierbar, wenn dieser aus höheren Kohlenwasserstoffen besteht als beim synthetischen Diesel für den Straßenverkehr. Ein synthetischer Dieselkraftstoff würde in der Schifffahrt nicht nur zu Minderung von Rußpartikelemissionen beitragen, sondern auch von  $\text{SO}_x$ -Emissionen, welche in der Schifffahrt aufgrund der Anwendung tlw. hochviskoser Kohlenwasserstoffe als Kraftstoffe immer noch ein Problem darstellen. Im Vergleich zu anderen synthetischen Kraftstoffoptionen, ist die Herstellung von FT-Diesel allerdings mit einem höheren Aufwand verbunden. Auch weist der FT-Diesel eine schlechtere Klimaverträglichkeit (gemessen an THG-Emissionen und LCA) auf.

Neben synthetischem Diesel ist auch der Einsatz von synthetischem LNG als Drop-In-Kraftstoff für Schiffe mit Gasmotoren möglich. Auch wenn **synthetisches LNG** nahezu ausschließlich aus Methan besteht, und damit hinsichtlich der Zusammensetzung nicht identisch mit fossilem LNG ist, kann syn-LNG ohne weiteres in bestehenden LNG-Schiffen verwendet werden. Die Einführung von (fossilem) LNG als Kraftstoff in der Schifffahrt wurde vor allem von immer strenger werdenden Regularien und Grenzwerten für Schadstoffemissionen motiviert. Mit der Anwendung von LNG ist bereits eine deutliche Reduzierung der Emissionen im Vgl. zum Schiffsdiesel und v.a. im Vgl. zum Schweröl möglich. Dennoch dominiert die Anwendung von flüssigen Schifffahrtskraftstoffen. Gründe hierfür sind v.a. die höheren Kosten für die LNG-Infrastruktur (Bau von LNG-Terminals), welche sich nach wie vor im Ausbau befindet (in Deutschland erfolgt die Betankung bspw. bislang nur über Bunkerschiffe) sowie die Investitionskosten für Antrieb, Kraftstoffsystem und Tank. Letzterer erfordert bei einem LNG-Schiff einen größeren Platzbedarf als bei einem Diesel-Schiff, da die volumetrische Energiedichte mit 22,5 MJ/l nur etwa halb so groß ist wie von einem Diesel-Kraftstoff. Die gravimetrische Energiedichte ist mit 50 MJ/kg zwar etwas höher, kompensiert aber nicht die geringere volumetrische Energiedichte. Um Methan in den flüssigen Zustand zu überführen, sind Tempera-

turen von  $-162\text{ °C}$  erforderlich, was einen zusätzlichen Energieaufwand bedeutet. Darüber hinaus muss bei der Anwendung von LNG der Methanschluß so gering wie möglich gehalten werden, da das Treibhausgaspotenzial von Methan etwa 25-mal größer ist als das von  $\text{CO}_2$ . Aktuell zeichnet sich eine stärkere Nutzungskonkurrenz mit der Energieversorgung ab, die dem Einsatz von (synthetischem) LNG in der Schifffahrt entgegensteht.

Neben Methanol gibt es in der Schifffahrt auch die Möglichkeit, weitere **oxygenierte Kraftstoffe** einzusetzen, um die Emissionen, v.a. von Ruß, zu senken; entweder durch Zumischung oder Verwendung als Reinkraftstoff. Hier werden v.a. Oxymethylenether (OME) genannt, die keine C-C Bindungen haben und deshalb drastisch reduzierte Rußemissionen zeigen. Die Anwendung in relevanten Mengen als Blendkomponente erfordert jedoch den Austausch von Dichtungen. Zudem erfordert die Herstellung von OME einen zusätzlichen Prozessschritt, da es über das Zwischenprodukt Methanol hergestellt wird. Dies verteuert den Kraftstoff, mit entsprechenden Auswirkungen auf den ökonomischen Nutzen.

Als kohlenstofffreie Schifffahrtskraftstoffe werden auch **Ammoniak** und **Wasserstoff** betrachtet. Ihre Verwendung bietet den Vorteil, dass bei der Anwendung keinerlei  $\text{CO}_2$  emittiert wird. Beide Kraftstoffe könnten, ähnlich wie auch Methanol, ebenfalls für den Antrieb mit einer Brennstoffzelle genutzt werden. Auch ist für beide eine Infrastruktur vorhanden, die für die Nutzung als Kraftstoff für die Schifffahrt jedoch ausgebaut werden müsste. Mit der Anwendung von Ammoniak muss sichergestellt sein, dass höhere  $\text{NO}_x$ -Emissionen als heute vermieden werden und der Ausstoß von Lachgas- ( $\text{N}_2\text{O}$ -)Emissionen nahezu ausgeschlossen ist, da dessen Treibhausgaspotenzial um das 273-fache größer ist als von  $\text{CO}_2$ . Auch wird der Einsatz von Ammoniak, aufgrund von dessen Toxizität, gegenwärtig nur für die Anwendung in Frachtschiffen diskutiert. Diese Nachteile entfallen beim Wasserstoff, welcher in Modellprojekten bereits zum Einsatz kommt. Da es sich jeweils um bei Raumtemperatur gasförmige Stoffe handelt, ist ein Einsatz in verflüssigter Form am wahrscheinlichsten, da so eine größere Energiedichte erzielt werden kann. Während Ammoniak bereits bei  $-33\text{ °C}$  in den flüssigen Zustand übergeht, ist für Wasserstoff eine Temperatur von  $-253\text{ °C}$  notwendig, verbunden mit einem dafür zusätzlichen Energiebedarf. Beide Technologieoptionen befinden sich noch im Forschungs- und Entwicklungsstadium, wobei für die Anwendung von Wasserstoff bereits erste einzelne Anwendungen bekannt sind und dieser auch als Drop-In-Kraftstoff in Mischung mit LNG in Dual-Fuel-Motoren angewendet werden kann, sofern das Schiff über einen für Wasserstoff ausgelegten Tank verfügt [Auer 2022]. Ein mit Ammoniak betriebenes Schiff ist gegenwärtig noch nicht im Einsatz. Es gibt hierzu bereits mehrere Forschungsvorhaben, jeweils mit dem Ziel, in den nächsten Jahren ein Ammoniak-Schiff zu betreiben [Trialog 2021; Viridis 2022; Habibic 2022].

**Tabelle 10-6:** Übersicht zur Bewertung der Kraftstoffoptionen in der Schifffahrt<sup>53</sup>  
 (😊 vorteilhaft, 😐 unvorteilhaft, 😞 nachteilig)

	Paraffinischer Diesel (FT)	Methan (synth. LNG)	Methanol	Oxymethylenether (OME)	Wasserstoff	Ammoniak
<b>Kraftstoffherstellung</b>	<p>😞 Aufwändige Herstellung (teuer)</p> <p>😞 Entstehung von Nebenprodukten</p>	<p>😊 Niedrigere Kosten</p> <p>😊 Sehr reine Herstellung möglich</p> <p>😊 CO<sub>2</sub>-aktiver Prozess</p> <p>😊 Maximaler Energieanteil pro C-Atom</p>	<p>😊 Sehr reine Herstellung möglich</p> <p>😊 CO<sub>2</sub>-aktiver Prozess</p> <p>😊 Energieanteil pro C-Atom nicht allzu hoch, da teiloxidiertes Kohlenstoff</p>	<p>😐 Herstellung über Methanol → zusätzlicher Prozessschritt</p>	<p>😊 Kein DAC oder andere C-Quelle notwendig</p>	<p>😊 Kein DAC oder andere C-Quelle notwendig</p>
<b>Infrastrukturverfügbarkeit</b>	<p>😊 Bestehende Infrastruktur kann genutzt werden</p>	<p>😐 Globale Infrastruktur teilweise vorhanden</p> <p>😐 Betankung bisher nur über Bunkerschiffe, LNG-Terminals notwendig</p>	<p>😐 Globale Infrastruktur vorhanden, Ausbau für Schifffahrt notwendig</p>	<p>😞 Bislang nicht vorhanden; Nutzung bestehender Systeme abhängig vom Anteil der Beimischung</p>	<p>😞 Globale Infrastruktur teilweise vorhanden, Ausbau für Schifffahrt notwendig, aber aufwändiger</p>	<p>😐 Globale Infrastruktur vorhanden, Ausbau für Schifffahrt notwendig</p>
<b>Anwendbarkeit (Drop-In / Blend / Motorenanpassung)</b>	<p>😊 Ersatz für MGO/ HFO (90 % der Schiffe)</p> <p>😐 Anpassung Motorsteuerung ggf. nötig</p>	<p>😊 Direkter Ersatz für fossiles LNG</p> <p>😊 Geringere Kraftstoffkosten als FT-Diesel</p> <p>😐 Anteil LNG-Schiff &lt; 10%</p> <p>😐 Nutzungskonkurrenz zum Energiesektor</p> <p>😞 Umrüstung von MGO/HFO-Schiffen notwendig</p> <p>😞 Geringere Energiedichte als Diesel → größerer Tank reduziert Ladung oder geringere Reichweite</p>	<p>😊 Entwicklung Methanol-Schiffe nahezu ausgereift, einzelne Schiffe im Einsatz</p> <p>😊 Förderung durch globale Player wie Maersk</p> <p>😞 Bislang keine Norm, nur Einzelzulassung</p> <p>😞 Energiedichte nur etwa halb so groß wie Diesel → größerer Tank reduziert Ladung oder geringere Reichweite</p> <p>😞 Kaum Bestand, Anpassung von Diesel-Schiffen notwendig</p>	<p>😞 Geringe Materialverträglichkeit → max. 10-15 % OME zumischbar</p>	<p>😐 Einzelne Testanwendungen, aber noch keine ausgereifte Technologie</p> <p>😞 Geringe Energiedichte (geringere Reichweite)</p> <p>😞 Bislang keine Norm</p>	<p>😐 Nutzungskonkurrenz zu Chemieindustrie, v.a. Düngemittel</p> <p>😞 Inkompatibel mit bestehenden Motoren</p> <p>😞 Technologie noch in Entwicklung, bislang kein einsatzfähiges Schiff bekannt</p> <p>😞 Toxizität → Anwendung nur für Hochseefrachter</p> <p>😞 Bislang keine Norm</p>

<sup>53</sup> 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.

	Paraffinischer Diesel (FT)	Methan (synth. LNG)	Methanol	Oxymethylenether (OME)	Wasserstoff	Ammoniak
<b>Schadstoff-Emissionen</b>	<p>😊 Deutliche Reduzierung der Rußemissionen im Vgl. zu MGO/HFO</p> <p>😊 Keinerlei SO<sub>x</sub>-Emissionen</p> <p>😞 Im Vgl. zu anderen syn. Kraftstoffen fällt Emissionsminderung geringer aus</p>	<p>😊 Deutliche Emissionsminderung, z.B. können TierIII-Grenzwerte für NO<sub>x</sub> eingehalten werden</p> <p>😊 Keinerlei SO<sub>x</sub>-Emissionen</p> <p>😞 Methanschlußpf muss vermieden werden</p>	<p>😊 Deutliche Emissionsminderung, ggf. keine Abgasnachbehandlung notwendig</p> <p>😊 Größtes Potenzial innerhalb C-haltiger Kraftstoffe bzgl. Minderung Rußemission</p> <p>😊 Keinerlei SO<sub>x</sub>-Emissionen</p>	<p>😊 Reduzierung SO<sub>x</sub>- und Rußemissionen bei Verwendung als Blendkomponente</p>	<p>😊 Keine C-haltigen Emissionen mehr, also auch kein CO<sub>2</sub></p> <p>😊 Keinerlei SO<sub>x</sub>-Emissionen</p>	<p>😊 Keine C-haltigen Emissionen mehr, also auch kein CO<sub>2</sub></p> <p>😊 Keinerlei SO<sub>x</sub>-Emissionen</p> <p>😞 Mehr NO<sub>x</sub>- und N<sub>2</sub>O-Emissionen möglich</p>
<b>THG-Bilanz</b>	<p>😞 Relativ etwas höhere THG-Emissionen</p>	<p>😞 Relativ geringe THG-Emissionen</p> <p>😞 CH<sub>4</sub>-Emissionen möglich</p>	<p>😞 Relativ geringe THG-Emissionen</p>		<p>😊 Keine C-haltigen Emissionen mehr</p>	<p>😊 Keine C-haltigen Emissionen mehr</p> <p>😞 N<sub>2</sub>O-Emissionen möglich</p>
<b>F&amp;E-Bedarfe</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Abgasnachbehandlung</li> <li>Motorsteuerung</li> <li>Schmier-eigenschaften</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Minimierung und Vermeidung des Methanschlußpfes</li> <li>Weiterentwicklung der Umrüstung von MGO/HFO-Schiffen auf reines Methan → Tanks so verbauen, dass keine Einbußen bei Ladung</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Weiterentwicklung der Umrüstung von MGO/HFO-Schiffen auf reines Methanol → Tanks so verbauen, dass keine Einbußen bei Ladung</li> <li>Komponenten (Motor, Tank- und Einspritzsysteme)</li> <li>Material (v.a. metallische Werkstoffe → Korrosion)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Komponenten (Motor, Tank- und Einspritzsysteme)</li> <li>Material (v.a. Kunststoffdichtungen)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Art der Anwendung (direkte Verbrennung oder Brennstoffzelle)</li> <li>Speicherung (flüssig, gasförmig, LOHC)</li> <li>Komponenten (Motor, Tank- und Einspritzsysteme)</li> <li>Material</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Minimierung und Vermeidung von NO<sub>x</sub>- und N<sub>2</sub>O-Emissionen</li> <li>Abgasnachbehandlung</li> <li>Art der Anwendung (direkte Verbrennung oder Brennstoffzelle)</li> <li>Speicherung (flüssig, gasförmig)</li> <li>Komponenten (Motor, Tank- und Einspritzsysteme)</li> <li>Material</li> <li>Maßnahmen im Havariefall</li> </ul>
<b>Begleitete EiV-Forschungsvorhaben</b>	PlasmaFuel	E2Fuels MethQuest	C3-Mobility MethQuest E2Fuels SynLink	ISys-tem4EFuel		AmmoniaMot AmmoniakMotor (beide nicht in EiV)

### **10.3.4 Forschungs- und Entwicklungsbedarfe bei der Kraftstoffnutzung in der Schifffahrt**

Um den Bedarf an weiteren Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten abzuschätzen, wurden auf der BEniVer Statuskonferenz am 1. Juli 2022 mehrere Workshops abgehalten, bei welchen die Beteiligten der Förderinitiative „Energiewende im Verkehr“ zu diesem Thema ihren Input liefern konnten. Der Input dieser Workshops wurde für die Ermittlung des Forschungs- und Entwicklungsbedarfs berücksichtigt.

#### **Übergeordnete Forschungsbedarfe**

In der Schifffahrt besteht der Forschungs- und Entwicklungsbedarf sowohl in technischen als auch nicht-technischen Bereichen. Zu den technischen Bereichen gehören die Forschung und Entwicklung von (neuen) Komponenten der Kraftstoffversorgung und -peripherie, der Retrofit bestehender Schiffe sowie der Schiffsneubau. Die zu berücksichtigenden nicht-technischen Aspekte betreffen die Infrastruktur an den Häfen sowie notwendige Regularien.

Im technischen Bereich kommen vor allem der Forschung und Entwicklung von Komponenten eine hohe Bedeutung zu, da diese die Grundlage und auch die Voraussetzung für den Einsatz der neuen Kraftstoffe bilden. Eine Umrüstung, wie auch der Neubau von Schiffen, basiert auf der (Weiter-) Entwicklung, Anpassung und Optimierung von Komponenten und Materialien. Für eine fortschreitende Entwicklung neuer Schiffe und Antriebstechnologien, bedarf es auch der Förderungen von Leuchtturmprojekten zum Bau von „Hightech-Schiffen“, die dazu dienen können, die genannten Fragestellungen umfassend zu beleuchten, wie auch ggf. weitere und neue Fragestellungen zu betrachten.

Hinsichtlich der **Komponenten** werden verschiedene Bauteile unterschieden; zu den wichtigsten zählen, neben dem Motor, Tank- und Einspritzsystem, die Abgasnachbehandlung sowie der Einsatz von Schmieröl. Grundsätzlich gilt, dass jede Komponente, die mit dem Kraftstoff in Berührung kommt, für den Einsatz neuer Kraftstoffe analysiert und eventuell angepasst oder neu entwickelt werden muss. Je nach Kraftstoff ergeben sich verschiedene Fragestellungen, die geklärt werden müssen und dazu auch neues Wissen zur Wechselwirkung zwischen dem Kraftstoff und den Komponenten erfordern. Konkrete Themen sind hierbei gegenwärtig:

- Das Verhalten des jeweiligen neuen Kraftstoffes im Motor muss untersucht werden, v.a. hinsichtlich möglicher Schäden aufgrund von dessen Materialkompatibilität (bzw. Inkompatibilität) und Eigenschaften.
- Umfassende Kenntnisse zur Verbrennungstechnik müssen erworben werden, sowohl hinsichtlich der Brennstoffchemie als auch der Auswirkung auf die Motorentechnik und die Brennkammer (z.B. Wärmefreisetzung).
- Das Bildungspotenzial von Emissionen bei der Verbrennung neuer Kraftstoffe muss detailliert untersucht werden. Es muss sichergestellt und gewährleistet sein, dass weder neuartige bzw. bisher nicht regulierte Emissionen im Abgas auftreten noch bereits bekannte und regulierte Emissionen nicht erhöht auftreten.
- Idealerweise soll der Einsatz neuer Kraftstoffe auch eine Verbesserung der Energieeffizienz bringen. Hierfür sollte die Motorreglung angepasst und optimiert werden, auch wenn es eine chemische Ähnlichkeit zu bereits heute eingesetzten Kraftstoffen gibt.

Gleiches gilt auch für den Einsatz von Dual-Fuel- und/oder Multi-Fuel-Konzepten, für welche neue Kraftstoffkombinationen berücksichtigt und beforscht werden müssen.

Die Klärung dieser Fragestellungen ist u.a. auch eine wichtige Voraussetzung, um zu entscheiden, inwieweit bestehende Motoren und Komponenten verwendet werden können oder ob Neuentwicklungen notwendig sind. Je nach Art und Zusammensetzung des Kraftstoffes kann diese Liste beliebig erweitert werden.

Eine **Umrüstung (Retrofit)** mit neuen bzw. angepassten Motorkomponenten und / oder des Tanksystems ist für bestehende, und hier vor allem ältere, Schiffe sinnvoll. Bei neueren Schiffen, die bereits eine verbesserte Effizienz aufweisen, bietet sich der Einsatz von Drop-In- oder Near-Drop-In-Kraftstoffen an. Eine genaue Grenze zwischen „alt“ und „neu“ lässt sich schwer ziehen, hier ist es v. a. eine Frage der Kosten, die geklärt werden muss. Dabei ist nicht nur entscheidend, wie lange das Schiff bereits im Einsatz ist und welche Laufzeit noch zu erwarten ist. Sondern auch, um welche Schiffsart (Binnenschiff, Hochseeschiff, Frachter, Personenschiff, ...) es sich handelt. Für Frachtschiffe kommt dabei auch die Art der Ladung hinzu (Containerschiff, Bunkerschiff, Schüttgut).

Ob für den Einsatz der neuen bzw. aktuell diskutierten Kraftstoffe wie Methanol, Wasserstoff oder Ammoniak ein Retrofit infrage kommt oder ein **Neubau** sinnvoller ist, gilt es in zukünftigen Studien zu untersuchen und zu klären. Während die Entwicklung von mit Methanol betriebenen Schiffen bereits bis zur Marktreife gelangt ist, bringt bspw. die Anwendung von Wasserstoff und v.a. von Ammoniak noch viele Fragestellungen mit sich (s.u.).

Zur verlässlichen und störungsfreien Sicherstellung der Kraftstoffversorgung und flächendeckenden Abdeckung der Häfen mit neuen, und gleichzeitig mehreren verschiedenen Kraftstoffen, muss die **Infrastruktur** entsprechend ausgebaut werden. Es wird notwendig sein, Häfen auszubauen und Bunkerschiffe zur Bevorratung bereitzustellen. Auch bereits vorhandene Lager sollten zum Tanken genutzt werden können. Je nach Hafen wird es unterschiedliche Lösungsmöglichkeiten für die Frage nach der optimalen Umsetzung geben. Auch wie bzw. in welcher Form und welchen Mengen die Kraftstoffe an den Häfen optimal verteilt werden, ist eine noch zu klärende Frage. Zudem ist dies ein Thema von globaler Dimension für die maritime Seefahrt. Dies gilt es in den entsprechenden weltweiten Organisationen zu behandeln und Lösungen verbindlich auf den Weg zu bringen.

Wie auch das Thema Infrastruktur, ist die Erarbeitung von **Regularien** ein Bereich, der alle Kraftstoffe betrifft. Erforderlich sind hier vor allem einheitliche Zulassungskonzepte für die Einführung neuer Kraftstoffe. Dazu müssen Spezifikationen definiert und Vorgaben zur Durchführung von Motorentests getroffen werden, um eine entsprechende Kompatibilität zu gewährleisten. Auch die internationale Förderung des Markthochlaufes ist von zentraler Bedeutung, da ein ausschließlich nationales Handeln ohne merklichen Effekt wäre vor dem Hintergrund der Bedeutung der maritimen Schifffahrt. Während Forschungseinrichtungen und Industrie bei der Erarbeitung von Spezifikationen und Vorgaben zu Motorentests wesentliche Beiträge und Impulse liefern, muss der internationale Markthochlauf durch politische Arbeit in zwischenstaatlichen Gremien / Organisationen vorangebracht werden. Die Erarbeitung von einheitli-



chen, international gültigen Regularien ist eine Notwendigkeit, nicht zuletzt vor dem Hintergrund, dass bislang keine Zulassungskonzepte für die Einführung neuer Kraftstoffe in der Schifffahrt existieren.

Die **Klimawirkung** von Schiffsemissionen ist derzeit noch stark durch die Effekte der  $\text{SO}_2$ -Emissionen geprägt, welche die Anzahl und Masse atmosphärischer Aerosolpartikel erhöhen und durch nachgelagerte Beeinflussung von Wolken eine kühlende Wirkung entfalten, welche der Klimaerwärmung entgegenwirkt [Righi et al. 2013]. Dabei führt die durch den Schiffsverkehr erhöhte Anzahl von Aerosolpartikeln, die als Wolkenkondensationskerne dienen können, bei der Bildung von Flüssigwasserwolken zu einer Erhöhung der Wolkentröpfchenzahl. Dies wiederum hat eine verstärkte Rückstreuung von Solarstrahlung zur Folge, was die abkühlende Wirkung hervorruft. Die Reduktion der Schwefelemissionen durch Einsatz alternativer Kraftstoffe im Schiffsverkehr würde diesen Effekt vermindern. Dies wäre tendenziell kontraproduktiv hinsichtlich der Klimaerwärmung, hätte aufgrund der toxischen Wirkung der Partikel jedoch einen positiven Effekt auf die **Luftqualität**, insbesondere in Hafennähe. Die existierenden Quantifizierungen der Klimawirkungen der Partikel sind jedoch noch vergleichsweise unsicher und bedürfen weiterer Forschung, die auch vergleichende Betrachtungen der möglicherweise ebenfalls veränderten Klimaeffekte der Stickoxidemissionen beinhalten sollte. Zudem wären die im Kapitel 3.3 beschriebenen „Trade-Offs“ zwischen Klima und Luftqualität noch im Detail zu untersuchen. Des Weiteren bedarf es gezielter Forschung zu den Wirkungen möglicher „neuer“ Emissionskomponenten wie Ammoniak oder Wasserstoff, welche bei Nutzung im Schiffsverkehr durch Leckagen und Schlupf (ggf. auch während der Kraftstoffbereitstellung) freigesetzt werden könnten.

### **Kraftstoffspezifische Forschungsbedarfe**

Der Kraftstoff mit dem höchsten Potenzial ist **Methanol**, welcher für die Schifffahrt einer der vielversprechendsten alternativen Kraftstoffe für die Zukunft ist. Neben dessen grundsätzlich anderer Brennstoffchemie, verglichen mit den heutigen zum Einsatz kommenden Schiffstreibstoffen (v.a. HFO), müssen z.B. auch dessen Materialeigenschaften und Hygroskopizität berücksichtigt werden. So gilt es Materialien für Dichtungen zu finden, die im Dauerbetrieb genauso (oder sogar besser) beständig sind, wie mit den gegenwärtigen Kraftstoffen und der aktuellen Motorentechnik. Die Hygroskopizität des Methanols führt zu höheren Wasseranteilen, als dies in konventionellen Kraftstoffen der Fall ist. Dadurch können sich auch salzhaltige Bestandteile mit dem Kraftstoff vermischen, was v.a. im Brennraum zu gravierenden Korrosionsschäden führen kann. Neben vertieften Kenntnissen über die daraus resultierenden Auswirkungen auf das zu verwendende Material, v.a. von metallischen Werkstoffen sowie den Einfluss bei der Verbrennung sind auch Reglementierungen zur Reinheit und dem Wassergehalt von Methanol erforderlich.

Der einfachste in die Schifffahrt zu integrierende alternative Kraftstoff ist **FT-Diesel**, der in MGO- wie auch in HFO-Schiffen verwendet werden kann. Gleiches gilt auch für **Biodiesel**, der hinsichtlich seiner Zusammensetzung ähnlich dem FT-Diesel ist. Technische Entwicklungen umfassen hier v.a. die Optimierung der Motorsteuerung und Kraftstoffversorgung aufgrund anderer Siede- und Fließeigenschaften. Da der synthetische Dieselmotorkraftstoff auch andere Schmiereigenschaften aufweist, sind für einen gesicherten Langzeitbetrieb auch Kenntnisse zur Wechselwirkung zwischen Kraftstoff und Motor bzw. Kraftstoff und Material von Interesse.

Im Vergleich zu anderen Kraftstoffen wird aktuell allerdings nicht davon ausgegangen, dass es hier im Betrieb zu Problemen kommt.

Eine bereits bekannte Art des Retrofits ist die Umrüstung eines Diesel- oder Schwerölschiffes für den Antrieb mit **LNG**. Dabei wird das Schiff von einem Monofuel- auf einen Dualfuel-Betrieb umgestellt. Diese Option ist prinzipiell für jede Art von Schiffen verfügbar. Dies gilt es weiterzuentwickeln und für den Einsatz mit synthetischem LNG (= reines Methan) zu optimieren, z.B. mit einer Methan-Direkteinspritzung oder hinsichtlich des Platzbedarfes bzw. der Raumaufteilung auf dem Schiff selbst. Zudem besteht ein erhöhter Entwicklungsbedarf in der Minimierung und Vermeidung des Methanschlupfes, da das Treibhausgaspotenzial von Methan das des CO<sub>2</sub> um das 25-fache übersteigt. Dies ist unabdingbar, damit der Einsatz des synthetischen LNG nicht zu einem erhöhten Treibhausgaspotenzial führt, verglichen mit dem Einsatz des bisherigen aus fossilen Quellen stammenden Kraftstoffs, vor allem wenn zunehmend mehr Schiffe mit einem LNG-Antrieb fahren.

Für die Anwendung weiterer **oxygenierter Kraftstoffe** ergibt sich v.a. die Frage nach der Materialverträglichkeit. Es ist bspw. bekannt, dass OME inkompatibel mit vielen gängigen Dichtungsmaterialien sind. Hier gilt es neue, und für den Einsatz unterschiedlicher Kraftstoffe optimierte Materialien zu finden.

Für den Einsatz von **Wasserstoff** und **Ammoniak** gilt es zunächst, erst noch grundlegende Fragen, wie die Art der Speicherung (flüssig, gasförmig, oder mittels LOHC für Wasserstoff), die Art der Anwendung (direkte Verbrennung oder in einer Brennstoffzelle) und auch die zu verwendenden Materialien zu klären. Hinsichtlich der Speicherung ist zumindest die Variante in flüssiger Form favorisiert, da so die größte Energiedichte erzielt werden kann. Vor dem Hintergrund von dessen Toxizität und der schlechten Verbrennungseigenschaften, besteht für die Nutzung von Ammoniak als Kraftstoff zunächst auch noch die Frage, ob dies ggf. nur für Schiffe relevant ist, die ohnehin für den Transport von Ammoniak eingesetzt werden oder eine Anwendung auch allgemein für Frachtschiffe und andere Schiffstypen sinnvoll möglich ist. Dabei wird auch die Anwendung von Ammoniak in Mischungen mit reaktiveren Kraftstoffen wie Wasserstoff, Ether oder Kohlenwasserstoffen diskutiert [Herbinet et al. 2022]. Um das Mitführen eines zusätzlichen Kraftstoffes zu vermeiden, besteht hier auch ein Ansatz darin, einen Teil des Ammoniaks vor der Verbrennung in Wasserstoff und Stickstoff zu spalten und dadurch eine Mischverbrennung von Ammoniak mit Wasserstoff zu ermöglichen. Diese Form der Anwendung ist vor allem mit dem Hintergrund der Nutzung von Ammoniak als Energie- bzw. Wasserstoffträger interessant. Dabei wird für den Export bestimmter, grüner Wasserstoff zu Ammoniak umgesetzt, da dieser eine wesentlich höhere Energiedichte aufweist und sich aufgrund des höheren Siedepunktes von -33 °C (im Vergleich zu -253 °C für Wasserstoff) einfacher handhaben lässt.

Bei der Verbrennung von Ammoniak, wie auch von Wasserstoff, muss allerdings auch sichergestellt sein, dass keine erhöhten Emissionen von Stickoxiden in die Atmosphäre gelangen. Mit der Nutzung von Ammoniak muss insbesondere auch die Bildung von Lachgas (N<sub>2</sub>O), welches ein um das 273-fache höhere Treibhausgaspotenzial als CO<sub>2</sub> hat, vermieden werden. Systeme zur Abgasnachbehandlung sind zwar für verschiedene Anwendungen bekannt, ihr Einsatz für die Verbrennung von Ammoniak und Wasserstoff in Schiffsmotoren ist aber eben-

falls noch Gegenstand der Forschung. Während die Nutzung von Wasserstoff auf Kurzstrecken (z.B. Fähren) in der Personenschifffahrt bereits eine Option darstellt, müssen hier für die Anwendung von Ammoniak auch viele sicherheitstechnische Fragen geklärt werden, v.a. wie im Havariefall zu verfahren ist.

Im Zusammenhang mit der Nutzung von Ammoniak oder Wasserstoff wären zudem, wie erwähnt, die Konsequenzen möglicher Emissionen dieser Substanzen durch Leckagen und Schlupf während der Kraftstoffherstellung und -nutzung zu untersuchen. Wie in Kapitel 3.3 bereits dargelegt, ist Ammoniak ein wichtiges Vorläufergas von atmosphärischen Aerosolpartikeln und kann daher zu einer Erhöhung der Partikelzahl und der Konzentration wichtiger Partikelkomponenten (z.B. Ammonium und Nitrat) führen. Dies kann eine kühlende Wirkung auf das Klima haben [Bellouin et al. 2011], aber auch zu einer verstärkten Beeinträchtigung der Luftqualität führen. Die Freisetzung von Wasserstoff könnte durch Beeinflussung der atmosphärischen Chemie ebenfalls relevante Klimaeffekte hervorrufen [Hauglustaine et al. 2022]. Sowohl die möglichen Emissionen von Ammoniak und Wasserstoff bei Nutzung als alternative Kraftstoffe, als auch die resultierenden Effekte auf Klima und Luftqualität, sind derzeit noch nicht im Detail bekannt und sollten daher Gegenstand zukünftiger Forschung sein.

Eine weitere Option für alternative Antriebe in der Schifffahrt ist der Einsatz **batterieelektrischer Schiffe** auf kurzen Strecken bzw. in Binnengewässern. Die Erhöhung der Batteriekapazität und damit der Reichweite und / oder Betriebsdauer bis zur nächsten Aufladung ist hier eine zentrale Aufgabe in der Forschung und Entwicklung.

### **10.3.5 Markthochlauf**

Die Schifffahrt gliedert sich in zahlreiche Segmente, was bei den Anforderungen an den Markthochlauf zu berücksichtigen ist. Neben Batteriebetrieb im Binnen- und Küstenverkehr und auf der Kurzstrecke [ITF 2020, 30ff.] , gibt es eine Reihe synthetischer Kraftstoffe, die möglicherweise zum Einsatz kommen könnten. Der bisherige Wissensstand erlaubt noch keine Aussage, welche dieser Kraftstoffe die vielversprechendsten sind und Aussicht haben, sich durchzusetzen. Insoweit hier **noch deutlicher Forschungsbedarf** besteht, sollte mit der Auswahl konkreter Technologien auf zusätzliche Erkenntnisse gewartet werden. Weitere zu klärende Punkte sind für den Markthochlauf der Kraftstoffbedarf, dessen Preis und die Folgen, die das auf den weltweiten Märkten zeitigt, die Herausforderung der Bestandsflotte, der globale Infrastrukturbedarf sowie die Bedeutung internationaler Organisationen und Regelwerke.

Schiffe spielen eine bedeutende Rolle für den Warenverkehr, vor allem international. Die wahrscheinlich **erwartbare Kostensteigerung des Warentransports** dürfte sich entsprechend deutlich in Preisaufschlägen für Importware niederschlagen [ICS 2021]. Angesichts der potenziellen Vielzahl der betroffenen Produkte besteht die **Möglichkeit sozialer Verwerfungen durch diese Transportkostensteigerungen - national wie international -, die entsprechend abzufedern** wären. Dabei ist auf das Verursacherprinzip zu achten.

In Abhängigkeit vom konkreten Kraftstoff erfordert der Einsatz synthetischer Kraftstoffe Umrüstungen oder gleich Neubauten für die Tankinfrastruktur. Die lange Lebensdauer von Schiffen bedingt hierbei zudem **Pfadabhängigkeiten**. Auch hier ist auf die Kopplung der Verkehrsbe-

reiche und die notwendigen Priorisierungen diverser Produktionspfade und –outputs zu achten, um einen Ausbau paralleler Infrastrukturen für mehrere Kraftstoffe gleichzeitig zu vermeiden bzw. auf das notwendige Maß zu begrenzen.

Weitere Wechselwirkungen sind möglich, etwa wenn der Bedarf an synthetischen Kraftstoffen eine Zunahme des Frachtverkehrs nach sich zieht. Da eine **Reduktion der Schiffsemissionen auf Null mit keiner derzeit absehbaren Technologie zu erreichen sein wird, sind begleitend auf See Maßnahmen zur Verkehrsreduktion** in Betracht zu ziehen. Darunter fällt etwa die Regionalisierung von Produktionsketten. Die Verpflichtung des Finanzsektors, nur noch nachhaltige Schifffahrt zu finanzieren, kann eine weitere förderliche Maßnahme sein.

### **10.3.6 Regulatorische Anforderungen**

Kraftstoffe für Schiffe unterliegen derzeit keiner Besteuerung. Die EU-Kommission beabsichtigt, die Richtlinie zur Energiebesteuerung dahingehend neu auszurichten. Einnahmen aus der Energiesteuer sollen für die Förderung alternativer Kraftstoffe umgewidmet werden [EC 2021a]. Es gibt weitere für die Markteinführung förderliche Mechanismen, die bereits implementiert sind. So hat die IMO eigene Ziele für die CO<sub>2</sub>-Reduktion benannt. Bis 2050 sollen die Treibhausgasemissionen gegenüber 2008 halbiert werden. Auch die Kohlenstoffintensität soll in zwei Schritten bis 2045 um 70 % fallen. Diese Ziele werden mit konkreten Maßnahmen unterlegt, die sowohl die Bestandsflotte effizienter machen soll als auch Schiffsneubauten [IMO 2019]. Darüber hinaus werden weitere Schadstoffe adressiert. Dazu zählen die Reduktion von Schwefel, luftverschmutzender Stoffe, ein Verbot der Freisetzung ozonabbauender Substanzen sowie die Regulierung von VOCs bei Tankern. Von Seiten der EU-Kommission soll die EU-MRV-Verordnung zur Berichtspflicht des Kraftstoffverbrauchs in den Gewässern der EU als Datengrundlage für die Einbindung der Schifffahrt in das EU-ETS herangezogen werden. Weiterhin wurden Ende März 2023 im Trilog-Prozess zwischen der EU-Kommission, dem EU-Parlament und dem Ministerrat ein mehrstufiger Plan zur Reduktion der THG-Emissionen aus CO<sub>2</sub>-, Methan und N<sub>2</sub>O-Emissionen um 80 % bis 2050 sowie eine 2 %-Quote für synthetische Kraftstoffe bis 2034 vereinbart. Diese Regelung muss allerdings noch gesetzlich verankert werden [Carroll 2023].

### **10.3.7 Gesellschaftliche Akzeptanz**

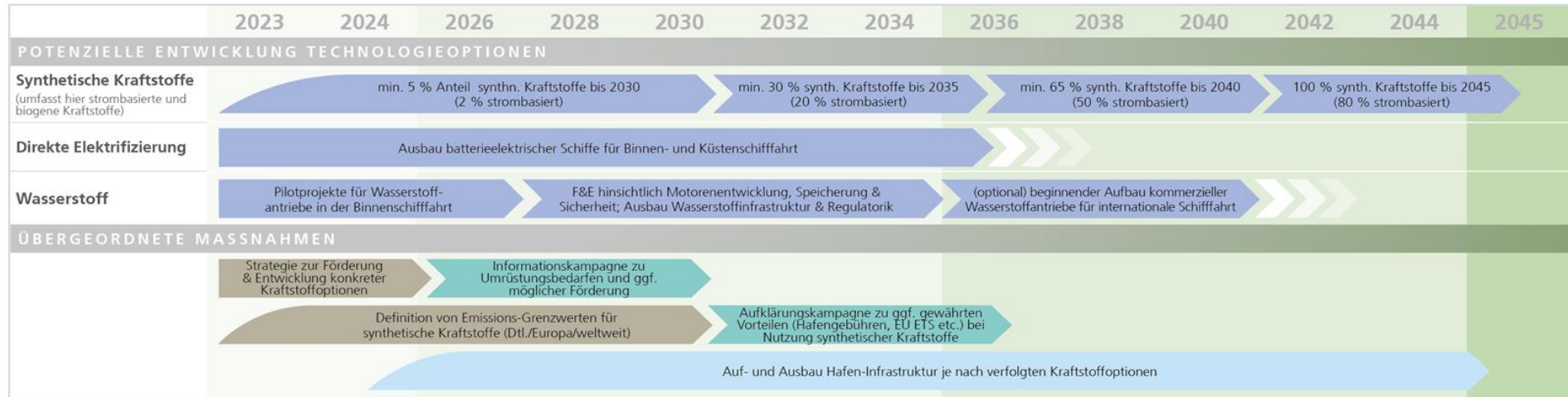
Vergleichbar zur Situation in der Luftfahrt werden synthetische Kraftstoffe als unentbehrlicher Bestandteil eines Weges zur Defossilisierung des Verkehrsbereichs Schifffahrt betrachtet, da alternative Antriebstechnologien (Batterie, Brennstoffzelle) den meisten Akteuren nur für wenige Nischenanwendungen geeignet erscheinen. Als bedeutende Hemmnisse für eine schnelle Verbreitung / Nutzung synthetischer Kraftstoffe werden bestehende Unsicherheiten bzgl. den Kostenverhältnissen und dem Zeithorizont einer Verfügbarkeit ausreichender Kraftstoffmengen identifiziert. Daneben erschweren es die anwendungsspezifischen Vor- und Nachteile der verschiedenen synthetischen Kraftstoffoptionen, sich in der diversifizierten Schifffahrtsbranche auf einen bestimmten Kraftstoff festzulegen. Es wird erwartet, dass je nach Schiffstyp und Einsatzfeld verschiedene synthetische Kraftstoffe benötigt werden.

Wegen der langen Nutzungszeiten von Schiffen und dem langwierigen Flottenwechsel wird dem Thema Retrofitting eine große Bedeutung zugeschrieben. Viele Akteure wünschen sich

hierzu einerseits Förderungen für weitere Forschungs- und Entwicklungsprojekte, andererseits finanzielle Hilfen für Reeder, die ihre aktuelle Flotte für die Nutzung neuer Kraftstoffe umrüsten möchten. Für den Einsatz von synthetischen Schiffskraftstoffen im internationalen Seeverkehr wird als Voraussetzung die zuverlässige Verfügbarkeit der Kraftstoffe an möglichst vielen Hafenstandorten gesehen, was umfängliche Anstrengungen zum Aufbau entsprechender Lieferketten und Infrastrukturen erfordert.

Akzeptanz und Nutzungsbereitschaft synthetischer Kraftstoffe würden durch einen Abbau von Unsicherheiten hinsichtlich Fragen der Normung und Regulatorik gefördert. Entsprechende Maßnahmen müssten auf europäischer Ebene (EU) und globaler Ebene (IMO) beschleunigt umgesetzt werden, wobei dafür Sorge zu tragen ist, dass es nicht zu Wettbewerbsverzerrungen durch regional unterschiedliche Bedingungen kommt. So lange keine wenigstens EU-weit einheitlichen Regeln vorliegen, werden jedoch auch mögliche lokale Anreizsysteme diskutiert, bspw. in Form vergünstigter Bedingungen bei Hafeneinfahrten / -liegezeiten für Schiffe, die mit synthetischen Kraftstoffen betrieben werden.

### 10.3.8 Roadmap für den Einsatz synthetischer Kraftstoffe in der Schifffahrt



**Abbildung 10-9** Roadmap in der Schifffahrt – Entwicklung Technologieoptionen und übergeordnete Maßnahmen

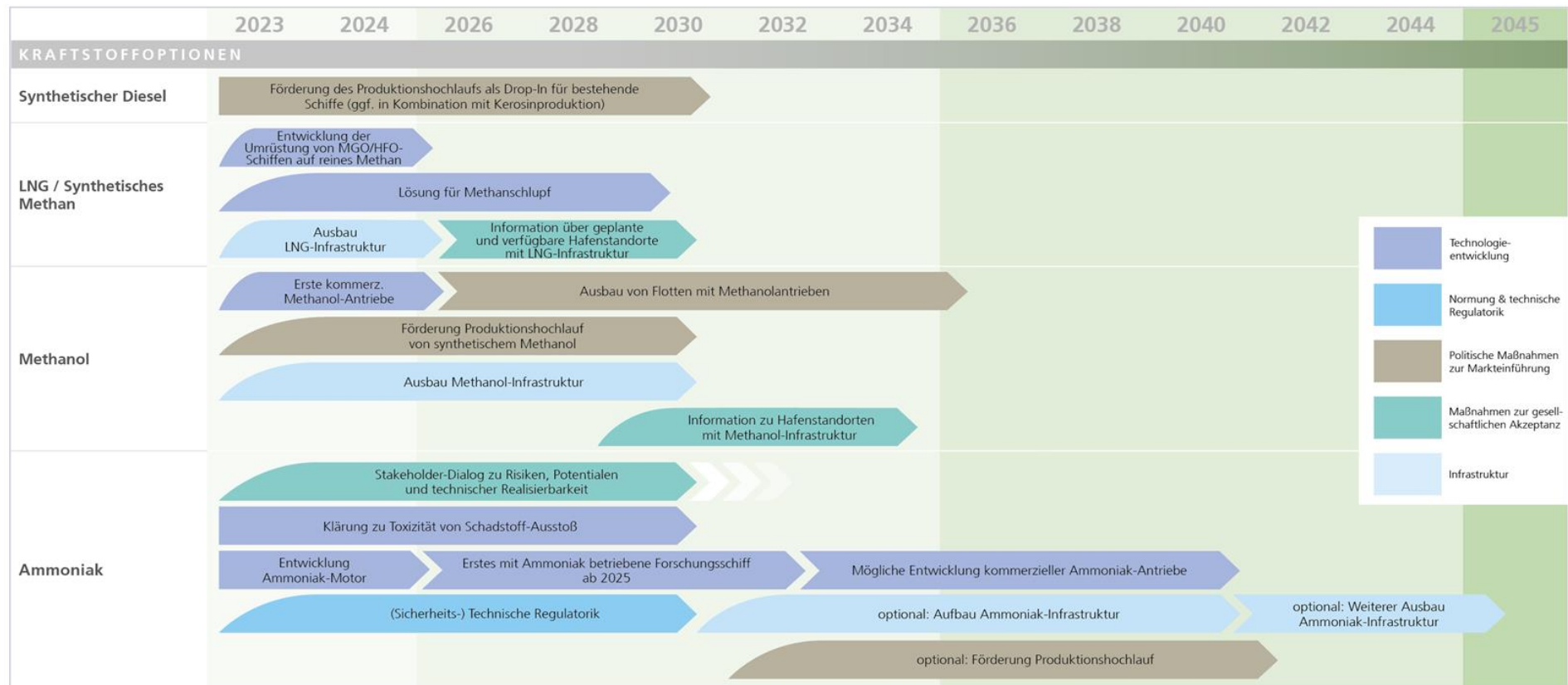


Abbildung 10-10 Roadmap in der Schifffahrt – Kraftstoffoptionen

## 10.4 Straßenverkehr

### 10.4.1 Potenziale von synthetischen Kraftstoffen im Straßenverkehr

CO<sub>2eq</sub> Emissionen im Straßenverkehr beliefen sich im Jahr 2021 auf 145 Mio. Tonnen. Dies entspricht 19,3 % der gesamten Emissionen in Deutschland [UBA 2022b]. Diese sind zu über 99 % auf die Verbrennung von fossilem Benzin und Diesel zurückzuführen [UBA 2022a]. Für die Erreichung der deutschen Klimaziele im Verkehrsbereich, mit Klimaneutralität im Jahr 2045, muss demnach der Einsatz fossiler Kraftstoffe sukzessive ersetzt werden. Hierfür sind technologische Lösungen notwendig, wie der Einsatz von Fahrzeugen mit Elektromotoren oder die Verwendung synthetischer Kraftstoffe. Die aktuelle Dominanz von Diesel- und Benzinfahrzeugen, die mit fossilen Kraftstoffen betrieben werden, wird perspektivisch durch ein breiteres Spektrum an Technologien abgelöst. Deren jeweilige zukünftige Rolle ist vor allem von nationalen und internationalen politischen Rahmenbedingungen, Investitionsentscheidungen der Fahrzeug- und Kraftstoffindustrie sowie technologischem Fortschritt abhängig.

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 von strombasierten Kraftstoffen haben außerdem das Potenzial, reibungslos in die bestehende Infrastruktur (Fahrzeuge, Tanklager, Tankstellen und Vertriebsstrukturen, etc.) integriert zu werden, 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 47,9 Millionen Pkw mit Verbrennungsmotor registriert [KBA 2022c]. Emissionsmessungen der Verbände haben außerdem gezeigt, dass strombasierte Kraftstoffe tendenziell weniger lokale Schadstoff-Emissionen bei der Verbrennung im Motor verursachen als fossile Kraftstoffe. In diesem Bereich besteht noch erhebliches Entwicklungspotenzial, wenn die Kraftstoffeigenschaften durch die Optimierung der Herstellungsprozesse verbessert werden.

Batterieelektrische Fahrzeuge bieten eine effiziente Nutzung von Energie, weil einerseits Strom im Fahrzeug direkt genutzt werden kann (ohne vorherige Prozessschritte, wie zum Beispiel die vorgelagerte Umwandlung von Strom in H<sub>2</sub> oder strombasierte Kraftstoffe) und weil der Wirkungsgrad von Elektromotoren mit über 90 % mehr als doppelt so hoch ist, als der von Verbrennungsmotoren [Kampker et al. 2018]. Die gravimetrische Energiedichte des im Fahrzeug in Batterien gespeicherten Stroms ist jedoch gering, was sich negativ auf die Reichweiten von BEVs auswirkt<sup>54</sup>. Modelle, die im Jahr 2021 in Deutschland verkauft wurden, verfügen im Mittel über WLTP-Reichweiten zwischen ca. 260 km (Minis / Kleinwagen) und 440 km (Mittelklasse-Segment)<sup>55</sup>. Weitere Nachteile sind relativ lange Ladevorgänge und die Inkompatibilität mit vorhandener Tank-Infrastruktur. Im Pkw-Bereich gibt es inzwischen eine große Auswahl an E-Fahrzeugen. Am 1. Juli 2022 gab es 162 Fahrzeugmodelle mit Plug-in-Hybridantrieb

<sup>54</sup> Der ID.3 von VW (Pro, 58 kWh, 107 kW, 5-trg.) mit einem Batteriegewicht von 364 kg kommt auf eine rechnerische gravimetrische Energiedichte von 0,16 kWh/kg [ADAC 2022]. Bei in Deutschland verkauftem Benzin beläuft sich die Energiedichte hingegen auf 11,9 kWh/kg (ohne Berücksichtigung des Gewichts des Tankes, das vernachlässigbar ist).

<sup>55</sup> Eigene Auswertung auf Basis von [ADAC 2022; KBA 2022d]



(PHEVs), sowie 217 rein elektrische Fahrzeugmodelle (Battery Electric Vehicles, BEVs).<sup>56</sup> Zusammen mit hohen Kaufprämien (bis zu 9.000 € für BEVs) und geringeren Betriebskosten, im Vergleich zu konventionellen Fahrzeugen, sind BEVs / PHEVs inzwischen wettbewerbsfähig, was zu einem stark wachsenden Anteil neu zugelassener Fahrzeuge im Pkw-Verkehr geführt hat (insgesamt 25 % BEVs / PHEVs im Jahr 2021 [KBA 2021b]).

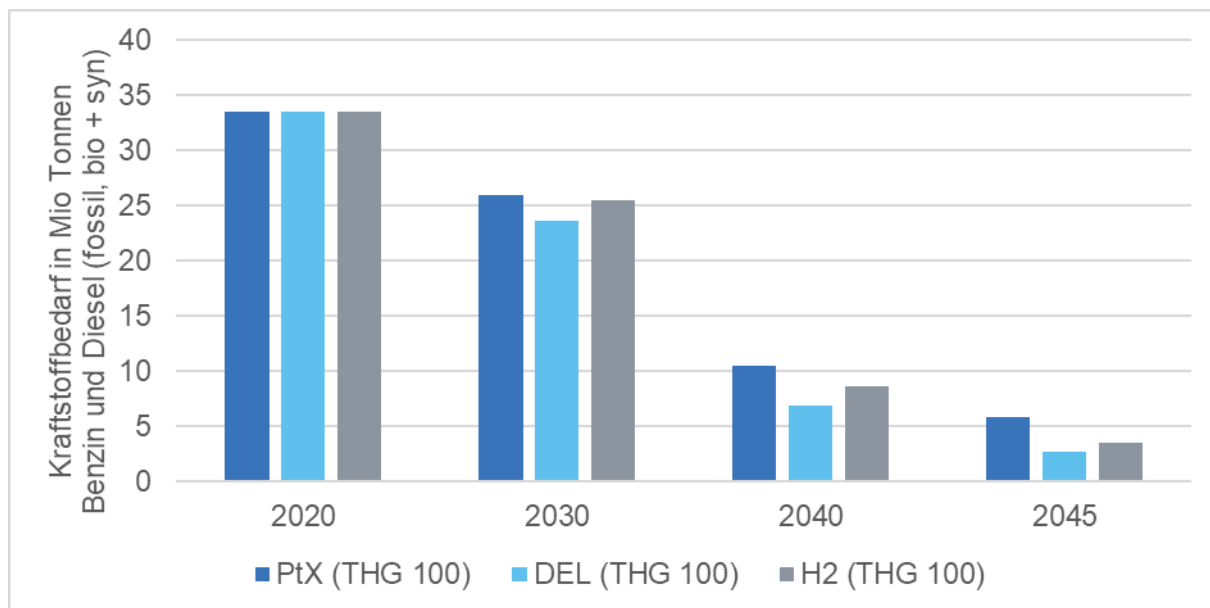
Wasserstoff-betriebene Fahrzeuge, wie z.B. Brennstoffzellenfahrzeuge verfügen über relativ hohe Reichweiten und eine kurze Betankungszeit. Der Reifegrad der Fahrzeugtechnologie ist jedoch geringer im Vergleich zu batterieelektrischen Fahrzeugen, so dass aktuell lediglich zwei Pkw-Fahrzeugmodelle in Deutschland verfügbar sind (Toyota Mirai und Hyundai Nexa). Aufgrund der erzielbaren hohen Reichweiten und kurzen Tankdauern ist im Lkw-Verkehr für Langstrecken-Anwendungen die Serienproduktion von Fahrzeugen von mehreren Herstellern im Aufbau (z.B. Cellcentric als Joint-Venture von Daimler und Volvo).

Um verschiedene mögliche Entwicklungen des Straßenverkehrs mit Fokus auf die Rolle von Fahrzeugtechnologien und strombasierten Kraftstoffen zu analysieren, wurden im Rahmen von BEniVer drei Technologie-Szenarien (THG100) modelliert: PtX, H2 und DEL (direkt-elektrisch), mit jeweils unterschiedlich akzentuiertem Fokus auf strombasierte Kraftstoffe, Wasserstoffantrieb, bzw. direkt-elektrischer Antriebe (siehe Kapitel 6.4).

Die Ergebnisse der Simulationen zeigen, dass E-Antriebe (batterieelektrisch bzw. Brennstoffzelle) in der Zukunft den Pkw- und Lkw-Bereich in allen drei Szenarien dominieren. Treiber hierfür sind aktuelle Pläne zur Ausgestaltung zukünftiger CO<sub>2</sub>-Flottengrenzwerte, die bei den Szenarien-Annahmen berücksichtigt wurden. Strombasierte Kraftstoffe können im DEL- und H2-Szenario annahmegemäß nur über Drop-In-Kraftstoffe in den Markt kommen. Das PtX-Szenario quantifiziert im Gegensatz dazu den Bedarf an strombasierten Kraftstoffen, falls eine Anrechnung von strombasierten Kraftstoffen über die CO<sub>2</sub>-Flottengrenzwerte bis zu 10 % der Neufahrzeuge möglich wäre. Folgende Bedarfe für flüssige Kohlenwasserstoffe ergeben sich für den Pkw-Bereich in den verschiedenen Szenarien:

---

<sup>56</sup> Eigene Auswertung auf Basis von [ADAC 2022]



**Abbildung 10-11:** Kraftstoffbedarf des Pkw-Bereichs in Deutschland gemäß BEniVer-Szenarien-Modellierung (Benzin und Diesel aufsummiert). Quelle: VECTOR21 Simulationen März 2022, gerundet

Abbildung 10-12 zeigt den Bedarf an flüssigen Kohlenwasserstoffen für den Lkw Bereich und die verschiedenen in Kapitel 6.4 beschriebenen Szenarien.



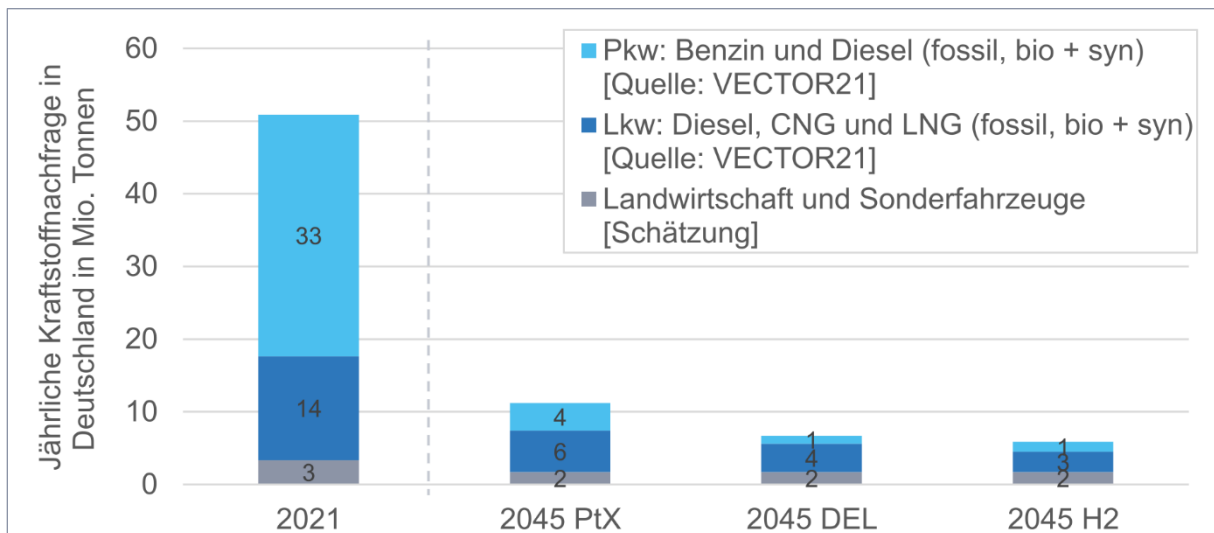
**Abbildung 10-12:** Kraftstoffbedarf des Lkw-Bereichs in Deutschland gemäß BEniVer-Szenarien-Modellierung. Quelle: VECTOR21 Simulationen Mai 2022, gerundet

Im Jahr 2045 besteht, je nach Szenario, noch ein Bedarf zwischen 2,7 Mio. Tonnen (32 TWh) und 5,9 Mio. Tonnen (70 TWh) flüssiger (erneuerbarer) Kohlenwasserstoffe für Pkw, bzw. 2,8 Mio. Tonnen (34 TWh) und 5,8 Mio. Tonnen (69 TWh) für Lkw. Im Pkw-Bereich ist dies trotz

schnell voranschreitender Elektrifizierung aufgrund der relativ langen Verweildauer von Bestandsfahrzeugen zu beobachten. Im Lkw-Bereich ist dies zusätzlich aufgrund der hohen Jahresfahrleistungen der schwer zu elektrifizierenden Schwerlast im Bestand begründet. Um Klimaneutralität im Jahr 2045 zu erreichen ist deshalb die Defossilisierung des Fahrzeug-Bestandes notwendig.

Neben den Pkw und Lkw bestehen vor allem bei der Landwirtschaft und bei Sonderfahrzeugen für Nischenanwendungen Potenziale für synthetische Kraftstoffe. Für die in Kapitel 5.5 beschriebenen unterschiedlichen Verkehrsbereiche, wie Landwirtschaft, Bundeswehr und Rettungsfahrzeuge, betrug der jährliche Kraftstoffbedarf im Jahr 2021 geschätzt rund 3,4 Mio. Tonnen. Dabei fällt mit 1,7 Mio. Tonnen Diesel der größte Bedarf auf die Landwirtschaft [Remmele 2022], wo vor allem im Bereich der schweren Maschinen mit hohem Leistungsbedarf und vielen Arbeitsstunden synthetische Kraftstoffe Vorteile gegenüber direktelektrischen Lösungen aufweisen. Der zukünftige Kraftstoffbedarf im Bereich der Landwirtschaft und Sonderfahrzeuge wird mit etwa 1,7 Mio. Tonnen Diesel im Jahr 2045 abgeschätzt.

Abbildung 10-13 setzt die überschlägig berechneten Analysen zum Kraftstoffbedarf der Landwirtschaft und Sonderfahrzeuge in Relation zu den aktuellen und zukünftigen Kraftstoffbedarfen von Pkw und Lkw nach den in Kapitel 6.1 beschriebenen BEniVer Szenarien. Es wird deutlich, dass der Anteil des Kraftstoffbedarfes für Sonderfahrzeuge, aufgrund der stetigen Elektrifizierung der Pkw- und Lkw-Flotte, von aktuell rund 6 % zukünftig auf 15 bis 30 % ansteigen könnte (unter der Annahme, dass der Kraftstoffverbrauch der Landwirtschaft dem Verkehr zugeschrieben werden würde).



**Abbildung 10-13:** Vergleich der jährlichen Kraftstoffnachfrage von Pkw und Lkw auf Basis der VECTOR21 Ergebnisse für die verschiedenen BEniVer Szenarien mit dem abgeschätzten jährlichen Kraftstoffbedarf von Landwirtschaft und Sonderfahrzeugen

#### 10.4.2 Besondere Herausforderungen im Straßenverkehr

Die Einführung neuer Technologieoptionen im Pkw- und Lkw-Bereich im Allgemeinen erfolgt in einem Markt mit einer Vielzahl an Normen, Regulierungen und Vorgaben, hohen und fragmentierten Nutzeranforderungen sowie – aufgrund ihrer hohen Wirtschaftsleistung – einem Bereich mit einer Schlüssel-Position für die deutsche Wirtschaft.

#### Gesetzliche Rahmenbedingungen

Welche Fahrzeugtechnologien in Europa verkauft werden können, wird entscheidend von der CO<sub>2</sub> Flottenregulierung der EU geprägt. So sieht die Regulierung in ihrer aktuellen Ausgestaltung vor, dass bis 2030 die durchschnittlichen CO<sub>2</sub> Emissionen der Neuzulassungen von Pkw und leichten Nutzfahrzeugen (LNF) um 37,5 % gegenüber 2021 sinken muss (Verordnung [EU 2019/631]), bzw. um 30 % (Verordnung [EU 2019/1242]). Aktuell sieht die Verordnung lediglich BEVs, PHEVs und FCEVs als Erfüllungsoptionen zur Reduzierung vor (sowie die Verbesserung der konventionellen Antriebe, was jedoch nur in geringem Maße umsetzbar ist). Im Rahmen des Fit for 55-Pakets wird die Verordnung EU 2019/631 überarbeitet. Gemäß dem Vorschlag zur Änderung der Verordnung EU 2019/631 vom 14. Juli 2021 [EU 2021/0197] soll eine Reduktion der Flottenemissionen im Jahr 2030 auf 55 % (Pkw) verschärft werden und im Jahr 2035 keine Fahrzeuge mit Verbrennungsmotoren mehr zugelassen werden. Dieser Vorschlag wurde in der Abstimmung zum Entwurf des EU-Rates vom 8. Juni 2022 bestätigt. Am 28.03.2023 wurde allerdings zusätzlich der Vorschlag in die Verordnung aufgenommen, dass Fahrzeuge, welche ausschließlich mit CO<sub>2</sub>-neutralen Kraftstoffen betrieben werden, auch nach 2035 noch zugelassen werden dürfen [European Council 2023].

EURO-Normen legen Grenzwerte für den Ausstoß von Luftschadstoffen durch den Betrieb von Kraftfahrzeugen fest. Sie werden von der Europäischen Kommission festgelegt und sind in den Mitgliedsstaaten wirksam und somit für alle neu zugelassenen Kraftfahrzeuge verbindlich.

Gemäß Green Deal wird die Kommission strengere Grenzwerte für Luftschadstoffemissionen von Fahrzeugen vorschlagen. Der aktuelle Entwurf sieht eine weitere Verschärfung bereits regulierter Schadstoffe sowie möglicherweise die Aufnahme weiterer Spezies wie Methan, Lachgas und Ammoniak vor [Samaras 2021]. Synthetische Kraftstoffe bieten Potenziale, durch vollständigeren Verbrennungsvorgänge, die Einhaltung verschärfter Grenzwerte für Feinstaub und möglicherweise auch anderer Luftschadstoffe zu verbessern.

Die THG-Quote verpflichtet die Inverkehrbringer von Kraftstoffen, bis 2030 stufenweise CO<sub>2</sub>-Emissionen zu senken. Um die Quote zu erfüllen standen ursprünglich Biokraftstoffe im Fokus. Aktuell stehen auch Strom für BEVs sowie aus erneuerbarem Strom produzierter Wasserstoff und strombasierte Kraftstoffe als Erfüllungsoptionen zur Verfügung. Für Wasserstoff und strombasierte Kraftstoffe (nicht jedoch für Strom für BEVs) gilt dabei das Zusätzlichkeitsprinzip, d. h. der verwendete erneuerbare Strom muss zusätzlich für die PtX-Anlage bereitgestellt werden. Wie dieses umzusetzen ist sowie weitere Vorgaben zur Produktion von synthetischen Kraftstoffen wird in zwei delegierten Rechtsakten für die Produktion von erneuerbaren Kraftstoffen nicht-biogenen Ursprungs (RFNBO) geklärt, die seit Mai 2022 als Entwurfsfassungen vorliegen [Ares(2022)3836651; Ares(2022)3836721].

Kraftstoffe, die als Beimischungen oder Reinkraftstoffe an Tankstellen angeboten werden, müssen in Deutschland den Anforderungen von Kraftstoffnormen entsprechen. Im Allgemeinen handelt es sich bei einer Norm um ein Dokument, das die Anforderungen an Produkte, Dienstleistungen oder Verfahren festlegt.<sup>57</sup> 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 bewertet [DECHEMA 2023].

Für den Verkauf von Kraftstoffen ist nicht nur die Festlegung des Produktstandards innerhalb einer Norm nötig, sondern auch die Erlaubnis des deutschen Gesetzgebers, der regelt, welche Kraftstoffe gehandelt werden dürfen. Dies ist in der zehnten Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (10. BImSchV) festgelegt. Diese gewährleistet, dass nur solche Kraftstoffe an Tankstellen verkauft werden dürfen, für die die Fahrzeughersteller garantieren, dass sie für den Betrieb ihrer Fahrzeuge geeignet sind.

Gemäß 10. BImSchV dürfen ausschließlich folgende Kraftstoffe in Verkehr gebracht werden: Ottokraftstoffe gemäß DIN EN 228, Dieselmotorkraftstoffe gemäß DIN EN 590, Biodiesel gemäß DIN EN 14214, Ethanol-Kraftstoff E85 gemäß DIN EN 15293, Autogas gemäß DIN EN 589, Erdgas und Biogas gemäß DIN EN 16723-2, Pflanzenölkraftstoffe (Rapsöl) gemäß DIN EN 51605, Wasserstoff (für Brennstoffzellenfahrzeuge) gemäß DIN EN 17124. Folglich sind z.B. paraffinische Kraftstoffe, für die schon eine Kraftstoffnorm existiert (DIN EN 15940) nicht als Reinkraftstoff in Deutschland an Tankstellen handelbar. Letzteres soll sich allerdings aufgrund eines Entschließungsantrages der Regierungsfractionen des Bundestages ändern [BT 20/5830]. Dieser fordert die Aufnahme der DIN EN 15940 in die 10. BImSchV und soll „zeitnah“ umgesetzt werden.

---

<sup>57</sup> In Deutschland ist das Deutsche Institut für Normung (DIN) für die Erarbeitung und Veröffentlichung von Normen zuständig. Der Fachausschuss Mineralöl- und Brennstoffnormung (FAM) ist zuständig für die Erarbeitung von Kraftstoffnormen. Dies erfolgt in Zusammenarbeit mit VertreterInnen der Fahrzeughersteller, Mineralölwirtschaft, Zuliefer-Industrie, Verbraucherverbänden und Behörden.

Für die Nutzung von neuen Kraftstoffen (z.B. 100 % paraffinischer Diesel) ist außerdem die Freigabe des Fahrzeug-Herstellers wichtig. Die freigegebenen Kraftstoffe sind gewöhnlich in der Betriebsanleitung dokumentiert. 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.

### **Akzeptanz**

Die Akzeptanz ist u.a. wichtig, um eine neue Technologie auf dem Markt erfolgreich einzuführen. Wichtige Aspekte neuer Technologien im Fahrzeugbereich sind Kosten, Anwenderfreundlichkeit und Umweltverträglichkeit.

Befragungen von Pkw-Nutzern und Akteuren des Wirtschaftsverkehrs im Rahmen von BEniVer [Frenzel et al. 2021; Nguyen et al. 2021] haben gezeigt, dass Kosten ein wichtiger Faktor sind. Dies gilt vor allem für Segmente, bei denen weder ein Nutzen ersichtlich ist (z.B. durch einen Imagegewinn durch die Bereitstellung klimafreundlicher Transporte) noch eine Pflicht zur Nutzung umweltfreundlicher Fahrzeuge / Kraftstoffe besteht (z.B. Fahrzeuge von Handwerkern). In Marktsegmenten mit großem Druck oder Nachfrage nach klimafreundlichen Lösungen, ist der Faktor Kosten insofern für die Markteinführung von strombasierten Kraftstoffen relevant, als dass sie in starker Konkurrenz mit elektrischen Antrieben stehen, da sich viele Segmente gut elektrifizieren lassen (v.a. Pkw und leichte Nutzfahrzeuge).

Für eine Akzeptanz neuer Kraftstoffe sollten diese flächendeckend verfügbar sein. Auch die Verfügbarkeit der Kraftstoffe im Ausland ist für einige Nutzergruppen wichtig. Bei Nutzern, die über eigene Tankstellen verfügen (z.B. Müllfahrzeuge), sind vor allem strombasierte Kraftstoffe interessant, die auch für Bestandsfahrzeuge genutzt werden können.

Bei der Einführung neuer Technologien zur Defossilisierung des Verkehrssektors ist die Lebensdauer relevant für die Umwälzung des Bestands. Vor allem Benzin-Pkw bleiben lange auf der Straße (ca. 16 Jahre). Für Fahrzeuge mit langen Verweildauern sind deshalb Umrüstooptionen attraktiv bzw. notwendig, oder auch drop-in-fähige, strombasierte Kraftstoffe.

#### **10.4.3 Kraftstoffoptionen im Straßenverkehr**

##### **Lkw**

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.

**Tabelle 10-7:** Übersicht der Bewertung der strombasierten Kraftstoffpfade für den Schwerlastverkehr (40 t zulässige Gesamtmasse)<sup>59</sup> (😊 vorteilhaft, 😐 unvorteilhaft, 😞 nachteilig)

	Synthetischer Diesel (paraffinisch)	Synthetisches Methan (LNG)	Synthetisches Methanol	Oxymethylen-ether (OME)	Dimethylether (DME)
<b>Kraftstoffherstellung</b>	😞 Hohe Kraftstoffkosten	😊 Niedrige Kraftstoffkosten 😊 Sehr reine Herstellung möglich	😊 Niedrige Kraftstoffkosten aber geringer Heizwert	😞 Moderate Kraftstoffkosten und geringer Heizwert	😊 Moderate Kraftstoffkosten und moderater Heizwert
<b>Infrastrukturverfügbarkeit</b>	😊 Als Blend (R33 <sup>60</sup> ) teilweise bereits verfügbar 😊 Aktuell (noch) keine Tankinfrastruktur für reinen paraffinischen Diesel (EN 15940) in DE 😊 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
<b>Anwendbarkeit (Drop-In / Blend / Motorenanpassung)</b>	😊 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 Motorengenerationen sind bereits freigegeben z.B. von Scania, Volvo, Mercedes, MAN und andere. <sup>61</sup>	😊 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)
<b>Schadstoff-Emissionen aus der Fahrzeugnutzung</b>	😊 Verringerte CO-, Ruß- und HC-Emissionen im Vergleich zu konv. Diesel	😊 Verringerte CO- und Ruß-Emissionen im Vergleich zu konv. Diesel 😞 Methanschlußpf 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
<b>THG-Bilanz über den gesamten Lebensweg</b>	😊 THG-Bilanz etwas höher durch den erhöhten Aufwand für die Kraftstoffproduktion	😊 Geringste THG-Bilanz im Vergleich der strombasierten Kraftstoffe, allerdings hohe Unsicherheiten aufgrund von Methanschlußpf	😊 relativ geringe THG-Bilanz im Vergleich der strombasierten Kraftstoffe		😊 relativ geringe THG-Bilanz im Vergleich der strombasierten Kraftstoffe
<b>F&amp;E-Bedarfe</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Integration der DIN EN 15940 in die BImSchV</li> <li>Verwendung von paraffinischem Diesel innerhalb der Bestandsflotte absichern</li> <li>Freigabe und Optimierung zukünftiger Motorengenerationen für paraffinischen Diesel</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Minimierung und Vermeidung des Methanschlußpfes</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Herausforderungen hinsichtlich der Motorlebensdauer aufgrund von Korrosion und Kavitation</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Dauerhaltbarkeit von Einspritzkomponenten</li> <li>Entwicklung von Motoren mit Diesel/OME Mischbetrieb</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Korrosionsneigung und Materialverträglichkeit des Kraftstoffes</li> </ul>

<sup>59</sup> Die hier aufgeführten, generischen Kraftstoffpfade stellen eine Auswahl der von den begleiteten EIV-Forschungsvorhaben beforschten Kraftstoffarten dar.

<sup>60</sup> Zusammensetzung: 7 %<sub>Vol</sub> Biodiesel, 26 %<sub>Vol</sub> HVO, 67 %<sub>Vol</sub> fossiler Dieselmkraftstoff (siehe: AVIA R33 – Diesel, Shell R33 Blue Diesel)

<sup>61</sup> Quelle: [EDi Hohenlohe]

	Synthetischer Diesel (paraffinisch)	Synthetisches Methan (LNG)	Synthetisches Methanol	Oxymethylen-ether (OME)	Dimethylether (DME)
Begleitete EIV-Forschungsvorhaben	SynLink		C3-Mobility	E2Fuels	FlexDME

Die Pfade paraffinischer Diesel, synthetisches Methan (LNG) und synthetisches Methanol werden genauer betrachtet. Insbesondere LNG hat ein hohes Potenzial für den Einsatz im Schwerlastverkehr. Die zur Integration in das Energiesystem notwendige Infrastruktur ist bereits teilweise vorhanden und der Kraftstoff kann in bestehenden LNG-Fahrzeugen direkt verwendet werden. Die Treibhausgas-Emissionen und der kumulierte Energieaufwand, aber auch die Kraftstoffkosten, sind vergleichsweise gering. Vor allem die geringen Kraftstoffkosten stellen einen großen Vorteil für die Akzeptanz, die Markteinführung und die Integration ins Verkehrssystem dar. Jedoch sind trotz der bereits vorhandenen Infrastruktur immer noch deren Ausbau, verfügbare Neufahrzeuge sowie Fahrzeug-Umrüstungen notwendig. Ein weiteres Problem ist, dass die Auswirkungen und das Vermeidungspotenzial des Methanschlupfes noch nicht vollständig abzuschätzen sind. Auch die risikobehaftete und aufwändige Handhabung (LNG muss bei kryogenen Temperaturen gehalten werden) stellt einen großen Nachteil dar. Zudem hat LNG eine vergleichsweise geringe Reichweite.

Anders als LNG, ist bei generischem Diesel die Infrastruktur bereits vorhanden. Der Kraftstoff kann in Bestandsfahrzeugen verwendet werden, ist drop-in-fähig und hat, im Gegensatz zu LNG, eine höhere Reichweite. Jedoch ist er aufwändiger und weniger effizient in der Herstellung. Auch bezüglich Nachhaltigkeit schneidet der synthetische Diesel im Vergleich am schlechtesten ab. In der Nutzung ist die Emissionsminderung geringer als bei den anderen Technologien und die Treibhausgas-Emissionen sowie der kumulierte Energieaufwand sind relativ hoch. Ein weiterer ausschlaggebender Nachteil sind die hohen Kraftstoffkosten bei der Nutzung.

Die beste Emissionsminderung in der Nutzung hat das synthetische Methanol. Insgesamt liegt die Umweltbewertung zwischen Diesel und Methan. Methanol ist gut lagerbar und die Handhabung ist leichter als bei Methan. Die Anschaffungskosten sind dabei vergleichbar mit dem von Diesel und das Risiko ist beim Aufbau erster Anlagen verhältnismäßig gering, da es bereits einen Markt für Methanol gibt. Jedoch ist ein Ausbau neuer Infrastruktur notwendig (keine Tankstellenverfügbarkeit). Der Kraftstoff ist nicht direkt kompatibel mit Ottomotoren und gar nicht kompatibel mit Dieselmotoren. Der Einsatz von M100 würde somit eine völlig neue Motorengeneration voraussetzen. Zudem ist der Energiegehalt je C-Atom geringer als bei Methan, was ein Nachteil in der Fertigung darstellt. Der hohe Verbrauch konterkariert zudem die niedrigen Kraftstoffkosten. Aufgrund dieser schwerwiegenden Nachteile schneidet das generische Methanol in den meisten Bewertungskriterien für diesen Verkehrssektor schlechter ab, als die anderen beiden Kraftstoffpfade: synthetisches LNG und synthetischer Diesel.

## Pkw

Innerhalb der Verbundvorhaben wurden verschiedene Kraftstoffe und Kraftstoffblends im Pkw-Bereich untersucht (darunter FT- und 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 BEniVer abgebildet.

**Tabelle 10-8:** Übersicht der Bewertung der generischen, strombasierten Kraftstoffpfade für den Pkw-Verkehr<sup>62</sup> (😊 vorteilhaft, 😐 unvorteilhaft, 😞 nachteilig)

	Synth. Benzin (Fischer-Tropsch)	Synth. Methanol	Synth. Methan (CNG)	Synth. Hythan (30 % <sub>Vol</sub> Wasserstoff + 70 % <sub>Vol</sub> Methan)
<b>Kraftstoffherstellung</b>	😞 Hohe Kraftstoffkosten	😊 Niedrige Kraftstoffkosten 😐 Geringer Heizwert	😊 Niedrige Kraftstoffkosten 😊 Sehr reine Herstellung möglich	😐 Höhere Kraftstoffkosten als bei reinem synth. Methan
<b>Infrastrukturverfügbarkeit</b>	😊 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
<b>Anwendbarkeit (Drop-In / Blend / Motorenanpassung)</b>	😊 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 % <sub>Vol</sub> Wasserstoff in DIN EN 16723-2 erlaubt. Daher nicht drop-in-fähig. 😐 CNG-Fahrzeuge können für den Betrieb mit Hythan umgerüstet werden
<b>Schadstoff-Emissionen aus der Fahrzeugnutzung</b>	😊 Überwiegend verringerte NO <sub>x</sub> -, 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 😞 Methanschluß muss vermieden werden	😊 C-haltige Emissionen im Vgl. zu CNG (syn. Methan) verringert
<b>THG-Bilanz über den gesamten Lebensweg</b>	😐 THG-Bilanz etwas höher durch den erhöhten Aufwand für die Kraftstoffproduktion	😊 Relativ geringe THG-Emissionen	😊 Relativ geringe THG-Emissionen, allerdings hohe Unsicherheiten aufgrund von Methanschluß	😊 Relativ geringe THG-Emissionen, allerdings hohe Unsicherheiten aufgrund von Methanschluß
<b>F&amp;E-Bedarfe</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Erfüllung der Qualitätsanforderungen der DIN EN 228</li> <li>Verwendung von FT-Benzin (und auch MtG) innerhalb der Bestandsflotte absichern</li> <li>Analyse des Einflusses unterschiedlicher Kraftstoffzusammensetzungen durch Additive und Oktanzahlbooster auf die Kaltstartfähigkeit sowie das Rußbildungspotenzial</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Herausforderungen hinsichtlich der Motorlebensdauer aufgrund von Korrosion und Kavitation</li> <li>Entwicklung von Dual-Fuel-tauglichen Fahrzeugen welche mit Methanol oder Benzin gefahren werden können</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Minimierung und Vermeidung des Methanschlupfes</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Minimierung und Vermeidung des Methanschlupfes</li> <li>Entwicklung von Dual-Fuel-tauglichen Fahrzeugen welche mit Methan (CNG) und Hythan mit beliebigen H<sub>2</sub>-Anteilen gefahren werden können</li> </ul>
<b>Begleitete EIV-Forschungsvorhaben</b>	SolareKraftstoffe	MEEMO	MethQuest, SynLink	

<sup>62</sup> Die hier aufgeführten, generischen Kraftstoffpfade stellen eine Auswahl der von den begleiteten EIV-Forschungsvorhaben beforschten Kraftstoffarten dar.

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, es entstehen keine Mehrkosten bei der Fahrzeuganschaffung, bzw. 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 nur für einen aktuell niedrigen CNG-Fahrzeugbestand.

Weniger Emissionen bei der Nutzung als Benzin weist Methan auf. Auch hier ist die Infrastruktur mindestens teilweise vorhanden und der Kraftstoff ist bekannt. Methan kann sehr rein hergestellt werden und weist einen maximalen Energieanteil pro C-Atom auf. Der Kraftstoff kann in bestehenden CNG-Fahrzeugen direkt verwendet werden und weist, im Vergleich zu anderen Kraftstoffoptionen, die geringsten Kraftstoff- sowie Nutzungskosten auf. Jedoch liegt der Fahrzeugbestand von CNG-Fahrzeugen in Deutschland nur bei etwa 100.000 Fahrzeugen im Vergleich zu 31 Mio. Benzin- und fast 15 Mio. Dieselfahrzeugen [KBA 2022b]. Auch sind die Anschaffungskosten für die Fahrzeuge, im Vergleich zu Benzinfahrzeugen, größer und die Reichweite geringer. Zudem ist ein Infrastrukturaufbau notwendig und es besteht ein höheres Risiko bei der Handhabung. Weiterhin ist hier ebenfalls anzumerken, dass die Auswirkungen und das Vermeidungspotenzial des Methanschlupfes noch nicht vollständig abzuschätzen sind.

Ähnliche Vorteile wie Methan, weist Methanol auf. Auch hier sind die Emissionen bei der Nutzung sowie die Kraftstoff- und Nutzungskosten geringer als beim Betrieb mit synthetischem Benzin. Es handelt sich abermals um einen CO<sub>2</sub>-aktiven Herstellungsprozess, bei dem das Endprodukt sehr rein hergestellt werden kann. Zusätzlich dazu sind bei Methanol, anders als beim Methan, auch die Anschaffungskosten nur unwesentlich höher als bei Benzinfahrzeugen. Mit Anpassungen kann Methanol ebenfalls im Ottomotor verwendet werden, und seine Anwendung ist (unter anderem in China und in den USA) bereits bekannt. Eine Umrüstung moderner, direktinspritzender Benzinfahrzeuge auf Betrieb mit Methanol ist allerdings meist nicht sinnvoll. Aktuell gibt es in Deutschland weder reine Methanolfahrzeuge, noch entsprechende Infrastruktur. Ebenfalls besitzt Methanol im Vergleich zu synthetischem Benzin eine geringere Reichweite. Der Energiegehalt ist, anders als beim Methan, nicht allzu hoch.

Auch das Hythan hat Vorteile, die dem von Methan und Methanol ähneln. Bei der Herstellung handelt es sich ebenfalls um einen CO<sub>2</sub>-aktiven Prozess, mit maximalem Energieanteil pro C-Atom (wie beim Methan), bei dem der Kraftstoff sehr rein hergestellt werden kann. Hythan besitzt ein höheres Potenzial zur Minderung von CO<sub>2</sub>-Emissionen in der Nutzung und die Kraftstoff- sowie Nutzungskosten sind geringer als beispielsweise beim Betrieb mit synthetischem Benzin. Jedoch sind sie, ebenso wie die Anschaffungskosten, höher als beim Betrieb mit synthetischem Methan und die Reichweite des Kraftstoffes noch geringer als beim Methan. Aktuell stellen zudem Normen ein Problem dar, die mehr als 2 % H<sub>2</sub> verbieten. Es wäre ein Infrastrukturausbau notwendig (die Infrastruktur müsste für einen variablen Wasserstoffanteil im Methan mit H<sub>2</sub>-Standards ausgeführt werden). Zudem stellt abermals der Methanschlupf ein potenzielles Problem in der Kraftstoffnutzung dar.

#### **10.4.4 Strategien zur Förderung von Forschung und Entwicklung im Straßenverkehr**

Um den Bedarf an weiteren Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten abzuschätzen, wurden auf der BEniVer Statuskonferenz am 1. Juli 2022 mehrere Workshops abgehalten, bei welchen die Beteiligten der Förderinitiative „Energiewende im Verkehr“ zu diesem Thema ihren Input liefern konnten. Der Input dieser Workshops wurde für die Ermittlung des weiteren Forschungs- und Entwicklungsbedarfs berücksichtigt.

##### **10.4.4.1 Forschungsbedarfe zur Anwendung synthetischer Kraftstoffe im Straßenverkehr**

#### **Übergeordnete Forschungsbedarfe**

Trotz eines verstärkten Hochlaufes der Elektromobilität, werden voraussichtlich auch 2045 noch verbrennungsmotorische Bestandsfahrzeuge betrieben werden. Um Klimaneutralität zu erreichen, besteht die Notwendigkeit, auch diesen Fahrzeugbestand bis 2045 zu defossilisieren. Aus diesem Grund sollten sich die aktuellen Forschungsvorhaben auf die **Entwicklung von drop-in-fähigen Kraftstoffen**, wie MtG, FT-Benzin, FT-Diesel und Methan fokussieren. Um die Verwendung der Kraftstoffe innerhalb der Bestandsflotte abzusichern, müssten verstärkt Forschungskapazitäten auf Dauerlaufversuche und Analysen zur Bestandtauglichkeit von MtG, FT-Benzin und FT-Diesel durchgeführt und kommende **Fahrzeuge** bereits heute für den Betrieb mit diesen **synthetischen Kraftstoffen freigegeben** werden. Dafür werden Demonstrationsanlagen in Tonnen-Maßstab zur Produktion von strombasierten Kraftstoffen in hoher Qualität benötigt. Weiterhin müssen etwaige normative Barrieren zur Verwendung der Kraftstoffe behoben werden. Zudem sollte eine verbindliche Regelung für den Hochlauf der Beimischung synthetischer Kraftstoffe für den Straßenverkehr erarbeitet werden, sodass Bestandsfahrzeuge ab dem Jahr 2045 lediglich CO<sub>2</sub>-neutrale Kraftstoffe tanken können.

#### **Kraftstoffspezifische Forschungsbedarfe**

Sofern das **MtG** bzw. das **FT-Benzin** die EN 228 einhalten, lassen sich diese Kraftstoffe bereits heute problemlos in den Verkehr bringen. Zur Einhaltung der Norm sind Additive und Oktanzahlbooster beizufügen. Die unterschiedliche Kraftstoffzusammensetzung, im Vergleich zu fossilem Benzin, hat Einfluss auf die Kaltstartfähigkeit sowie das Rußbildungspotenzial. Um den Einfluss dieser Effekte auf den Einsatz von MtG oder FT-Benzin in der Fahrzeugflotte besser einschätzen zu können, besteht weiterhin Forschungsbedarf. Aktuell werden diese Faktoren außerdem noch nicht in der EN 228 berücksichtigt.

Der Einsatz von **paraffinischem Diesel** ist von vielen Fahrzeugherstellern für ihre Dieselmotoren bereits zugelassen. Allerdings ist die Norm DIN EN 15940 für paraffinischen Diesel nicht in der 10. BImSchV aufgeführt. Darum darf synthetischer Diesel als Reinstoff in Deutschland aktuell noch nicht an öffentlichen Tankstellen angeboten werden. Für die Defossilisierung des Fahrzeugbestandes ist der Einsatz von synthetischem Diesel allerdings notwendig, weshalb eine Integration der DIN EN 15940 in die BImSchV dringend erforderlich ist. Bei **Dieselmotoren** werden weiterhin ebenfalls Aufheizmaßnahmen für das Abgasnachbehandlungssystem zur NO<sub>x</sub>-Reduktion bei Kaltstart und Stadtfahrten untersucht, damit die zukünftige EUROVII-Regulierung eingehalten werden kann.

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. Derzeit wird jeweils an einer speziellen Norm für den Einsatz des entsprechenden Kraftstoffes im Verbrennungsmotor gearbeitet, welche auf DIN-Level als technische Spezifikation finalisiert und nunmehr auf europäischem Level (CEN) weitergeführt werden. Es gibt bereits Entwicklungsprojekte zum Einsatz von **M100** im modernen, direkteinspritzenden 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. Weiterhin zeigen Retrofitpakete für leichte und schwere Nutzfahrzeuge zum Betrieb mit **Methanol** und **DME** Potenzial bei der Tank-to-Wheel CO<sub>2</sub>-Reduktion und Schadstoffemissionsverbesserung. **DME** und **OME** könnten aufgrund der rußarmen Verbrennungseigenschaften als Diesel-Ersatzkraftstoff für schwer elektrifizierbare Verkehrsbereiche in Frage kommen. Jedoch müssen beim Einsatz von **OME** die Dauerhaltbarkeit von Einspritzkomponenten noch gezeigt sowie die Unverträglichkeit mit bestimmten Polymerwerkstoffen analysiert und beachtet werden. Interessant wäre die Entwicklung von Motoren, welche im Diesel- / OME-Mischbetrieb betrieben werden können. Beim Einsatz von **DME** muss die Korrosionsneigung und Materialverträglichkeit des Kraftstoffs im Langzeittest vertiefend analysiert werden. Neben dem Straßenverkehr, lässt sich **DME** auch als Beimischung zu LPG in anderen Sektoren wie Kochen und Heizen einsetzen. Weiterer Forschungsbedarf für den Einsatz von **OME** besteht in der Entwicklung angepasster Katalysatoren für die Abgasnachbehandlung sowie der Additivierung zur Verbesserung der Schmierfähigkeit sowie zur Stabilisierung des Kraftstoffs. Im Falle von DME konnte die Funktionalität der Abgasnachbehandlungskomponenten, unter Einsatz seriennaher Katalysator-technologie, bereits nachgewiesen werden.

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. Daher sollten die Forschungskapazitäten eher auf vielversprechendere Kraftstoffe fokussiert werden.

#### 10.4.4.2 Forschungsbedarfe zur Wirkung auf Klima und Luftqualität

Analysen zur Klimawirkung der Emissionen des Straßenverkehrs richten sich häufig vornehmlich auf CO<sub>2</sub>. Kurzlebige Emissionskomponenten wie Stickoxide oder Partikel werden dahingegen in vielen Fällen hauptsächlich in Bezug auf Beeinträchtigungen der Luftqualität diskutiert. Zahlreiche Studien zeigen jedoch sehr erhebliche Klimawirkungen dieser Komponenten [Hoor et al. 2009; Uherek et al. 2010; Righi et al. 2013; Mertens et al. 2018]. Da sich die Emissionen kurzlebiger Substanzen, und entsprechend auch ihre Wirkungen auf Klima und Luftqualität, mit der Nutzung synthetischer Kraftstoffe erheblich verändern können, müssen diese Aspekte in zukünftigen quantitativen Bewertungen Berücksichtigung finden. Dabei sind sowohl Vergleiche mit den Wirkungen herkömmlicher Kraftstoffe, als auch der Wirkungen alternativer Kraftstoffe untereinander erforderlich. Aufgrund der Komplexität und gerade auch

der häufig starken Nichtlinearität der hier relevanten chemischen und mikrophysikalischen Prozesse, sind dazu zunächst Studien mit detaillierten, räumlich auflösenden Klima-Chemie-Modellen und Luftqualitätsmodellen erforderlich. Zur effizienten Bewertung können daraus nachgelagert auch vereinfachte Bewertungsmodelle abgeleitet werden. Folgende Aspekte sollten dabei Berücksichtigung finden:

- **Chemische Wirkungen der Emission von Stickoxiden (NO<sub>x</sub>) und Kohlenwasserstoffen auf Ozon und Methan:** Durch die Emission von NO<sub>x</sub> und Kohlenwasserstoffen (sowie auch Kohlenmonoxid) kann es zu einer verstärkten Ozonproduktion sowie zu einem Abbau von Methan kommen. Da sowohl Ozon als auch Methan wichtige Treibhausgase darstellen, führen Veränderungen in ihren Konzentrationen zu entsprechenden Klimaeffekten. In diesem Zusammenhang ist zu klären, inwieweit sich diese Prozesse mit der Nutzung synthetischer Kraftstoffe verändern.
- **Veränderte Klimawirkung des Verkehrs durch Veränderung der Emissionen von Partikeln und Partikelvorläufgasen:** Bei der Verbrennung klassischer Kraftstoffe gebildete Aerosolpartikel bestehen vorwiegend aus Komponenten wie Sulfat, Nitrat, schwarzem oder organischem Kohlenstoff. Durch Beeinflussung der Bewölkung und des atmosphärischen Strahlungshaushaltes, haben die Partikel in der Regel eine kühlende Wirkung auf das Klima. Einige Aerosolkomponenten, insbesondere Ruß, können jedoch auch wärmend wirken. Durch die Verwendung synthetischer Kraftstoffe kommt es voraussichtlich zu einer Reduktion der Emissionen der meisten Partikelkomponenten und ihrer Vorläufgase, wodurch unter anderem auch die kühlende Wirkung der Partikel reduziert wird, was die Klimaerwärmung verstärken würde. Gleichzeitig könnte es jedoch unter bestimmten Bedingungen zu einer verstärkten Emission organischer Substanzen aus der Klasse der Aldehyde und Ketone kommen (Kapitel 4.3), welche wiederum die Bildung sekundärer organischer Aerosole begünstigen können, was dem Effekt entgegenwirken könnte. Diese Prozesse sollten daher Gegenstand zukünftiger quantitativer Untersuchungen sein.
- **Mögliche Effekte der Emissionen von Wasserstoff:** Durch Herstellung und Nutzung synthetischer Kraftstoffe können auch „neue“ Emissionskomponenten freigesetzt werden. Als ein wichtiges Beispiel wäre hier molekularer Wasserstoff anzuführen, der durch Leckagen und Schlupf freigesetzt werden könnte. Wasserstoff kann als reaktives Gas beispielsweise Einflüsse auf das atmosphärische Ozon oder Methan haben [Hauglustaine et al. 2022]. Zudem werden auch mögliche Einflüsse auf die Aerosol-Chemie diskutiert. Die Klimawirksamkeit dieser Prozesse sollte daher Gegenstand zukünftiger Forschungsvorhaben sein.
- **Nicht-CO<sub>2</sub>-Effekte im Vergleich zur Reduktion des CO<sub>2</sub>-Effekts:** Die beschriebenen Wirkungen von Nicht-CO<sub>2</sub>-Emissionen sollten in zukünftigen Forschungsvorhaben quantitativ in Relation zur der durch synthetische Kraftstoffe erreichten Reduktion des CO<sub>2</sub>-Effektes betrachtet werden.
- **Aspekte der Luftqualität:** Nicht zuletzt haben nahezu alle oben beschriebenen kurzlebigen Emissionskomponenten schädliche Wirkungen auf die Luftqualität und die menschliche Gesundheit [Manisalidis et al. 2020]. Neben Untersuchungen der Klimawirkungen von Emissionen des Verkehrs und auch der Kraftstoffherstellung und -bereitstellung müssen daher auch entsprechende Analysen der Wirkungen auf die Luftqualität und die menschliche Gesundheit erfolgen. Die Konsequenzen der Nutzung

synthetischer Kraftstoffe für die Luftqualität sind im Detail zu untersuchen und in Relation zu den Wirkungen herkömmlicher Emissionen zu betrachten.

- **Durch die Abgasnachbehandlung verursachte Emissionen zusätzlicher Schadstoffe** (z.B. Ammoniak oder Isocyanensäure) und ihre atmosphärischen Wirkungen sollten ebenfalls Gegenstand weiterführender Betrachtungen sein.

#### **10.4.5 Markthochlauf**

Anders als für die Luft- und Schifffahrt gilt für den bodengebundenen Verkehr, worunter in großen Teilen der Straßenverkehr zu verstehen ist, dass für viele Anwendungen effizientere Alternativen zur Defossilisierung bereitstehen. Namentlich handelt es sich hierbei vor allem um Elektroantriebe und teilweise um Brennstoffzellenfahrzeuge. Hinzu kommt, dass eine Flottenerneuerung im Straßenverkehr in kürzeren Zyklen erfolgt als bei den Flotten der Schiff- und Luftfahrt. Mit nennenswerten Mengen synthetischer Kraftstoffe wird dagegen erst frühestens ab den 2030er Jahren gerechnet. Dieser Zeitraum sollte für die Elektrifizierung genutzt werden, da **synthetische Kraftstoffe im nächsten Jahrzehnt weder bei Neufahrzeugen noch im Bestand nennenswerte Beiträge zur THG-Reduktion im bodengebundenen Verkehr liefern können**. Zugleich würde ein entsprechendes Vorgehen es erlauben, die nur in begrenztem Umfang verfügbaren Mengen synthetischer Kraftstoffe auf jene Sektoren und Bereiche zu konzentrieren, welche mit anderen bisher verfügbaren Technologien nicht oder nur unter großen Herausforderungen defossilisiert werden können. Im Sinne eines effizienten Einsatzes physischer wie finanzieller Ressourcen, ist vor diesem Hintergrund genau abzuwägen, ob eine politische Förderung synthetischer Kraftstoffe im bodengebundenen Verkehr den gesellschaftlichen Nachhaltigkeitskriterien genügen kann und den planetaren Grenzen Rechnung trägt.

Der deutlich höhere Primärenergiebedarf (vgl. z.B. [Ueckerdt et al. 2021a; Göckeler et al. 2020]), die dauerhaft schlechtere THG-Bilanz (vgl. Kapitel 4.5 sowie [Ueckerdt et al. 2021a; Wietschel et al. 2022; Jöhrens et al. 2022]), höhere Betriebs- und Systemkosten [Wietschel et al. 2022; Göckeler et al. 2020; Basma et al. 2021; Burchardt et al. 2021; Jöhrens et al. 2022; Mottschall et al. 2019] und die Begrenztheit der natürlichen Ressourcen (z. B. Wasser und Fläche), die eine Beschränkung der Stromproduktionskapazitäten bedingen, machen deutlich, dass **die Einführung synthetischer Kraftstoffe im Pkw- und SNF-Bereich derzeit nicht sinnvoll ist**. Die gesteckten Nachhaltigkeitsziele sind, bei begrenzten finanziellen Ressourcen, in die Elektromobilität investiert effektiver zu erreichen. Die zu errichtenden Produktionskapazitäten werden gleichzeitig dringender in anderen Sektoren benötigt.

Des Weiteren kann der Blick auf das Mobilitätssystem im Ganzen nicht außer Acht gelassen werden. Eine **umfassende Mobilitätswende**, die eine möglichst weitgehende Abkehr vom motorisierten Individualverkehr einschließt (z.B. Modal Shift, geteilte Mobilität, Radverkehr, etc.) könnte **eine energetisch effizientere Strategie mit höherem Potenzial zur THG-Reduktion** darstellen. Diese Maßnahmen sind zwar kein direkter Forschungsgegenstand von BEniVer, sollten aber als politische Maßnahmen dringend beachtet werden, um Wirkung und Folgen regulatorischer Eingriffe angemessen und kritisch bewerten zu können. Zusammenfassend kann die politikwissenschaftliche Empfehlung nur lauten, eine Mobilitätswende herbei zu führen, welche die Zahl der Bestandsfahrzeuge bis 2045 und ihre Verbräuche minimiert.

Gleichzeitig ist eine Beschleunigung des Aufbaus von Ladeinfrastruktur anzustreben und Zulassungen von Elektroautos als Neufahrzeuge zu unterstützen. Für den Bereich der SNF sollte der Schwerpunkt auf die Weiterentwicklung der Technologie für elektrische 40t-Lkw und die Langstrecke gelegt werden. Synthetische Kraftstoffe kämen in diesem Teil des Verkehrssektors erst in Frage, wenn eine zeitnahe Elektrifizierung sich als undurchführbar erweisen würde [Ueckerdt et al. 2021b].

#### **10.4.6 Regulatorische Anforderungen**

Der bodengebundene Verkehr, insbesondere der Straßenverkehr, unterliegt einer umfassenden Reglementierung, die an dieser Stelle nicht näher wiedergegeben werden kann. Zentral sind für die Frage nach Markteinführungsmechanismen für diesen Verkehrssektor die Gesetzesentwürfe, welche aktuell auf EU-Ebene beraten werden. Zu nennen ist hier insbesondere die Einigung auf eine Absenkung der CO<sub>2</sub>-Emissionen bis 2030 für Pkw um 55 % gegenüber 2021 und für Lieferwagen um 50 %. Weiterhin wird die Kommission bis 2025 eine neue Methodik zur Bestimmung der Lebenszyklus-Emissionen von Fahrzeugen vorlegen [Packroff und Carroll 2022]. Eine Vereinbarung vom 27.10.2022 sieht zudem vor, dass alle in der EU vertriebenen Pkw und Kleintransporter bis 2035 emissionsfrei sein müssen. Auf Drängen der Bundesrepublik Deutschland erfolgte im März 2023 eine Verständigung dahingehend, dass Neufahrzeuge mit Verbrennungsmotoren auch über 2035 hinaus zugelassen werden können, sofern sie ausschließlich mit „klimaneutralen Treibstoffen“ betrieben werden, wobei die zielgenaue Umsetzung dieser Regelung als schwierig eingestuft wird [Bundesregierung 2022b]. Die EU-Kommission setzt den Schwerpunkt ihrer Gesetzgebung für den Straßenverkehr dennoch auf die Elektromobilität und will synthetische Kraftstoffe gezielt in der Luft- und Schifffahrt zum Einsatz bringen.

#### **10.4.7 Gesellschaftliche Akzeptanz**

Unter den im Rahmen der Akzeptanzuntersuchungen befragten Akteuren gehen die Einschätzungen darüber, ob synthetische Kraftstoffe für Anwendungen im Straßenverkehr genutzt werden sollten bzw. im Sinne einer Defossilisierung erforderlich sind, teilweise auseinander. Weitgehend befürwortet wird der Einsatz synthetischer Kraftstoffe in den Bereichen des bodengebundenen Verkehrs, die mit derzeitigen und in absehbarer Zeit verfügbaren Batterietechnologien kaum oder gar nicht auf direktelektrische Antriebe umzustellen sind (Fern- bzw. Schwerlastverkehr, Spezialfahrzeuge und Sondermaschinen, z.B. in Landwirtschaft und Baugewerbe). Ein breiter Einsatz synthetischer Kraftstoffe im Pkw-Bereich ist umstritten, je nach Akteursgruppe wird er mehrheitlich grundsätzlich befürwortet oder eher skeptisch betrachtet und wenn, dann nur als Übergangslösung unterstützt.

Eine Nutzungsbereitschaft ist an einige Bedingungen geknüpft, an erster Stelle daran, dass dem Endnutzer durch synthetische Kraftstoffe keine oder nur geringe Mehrkosten entstehen. Für viele sind zudem die nachhaltige Herstellung der Kraftstoffe und ein tatsächlicher positiver Klimaschutzeffekt Voraussetzungen für eine Bereitschaft zur Nutzung.

An synthetische Kraftstoffe werden die Erwartungen gestellt, dass sie möglichst ohne Umrüstungsbedarf in vorhandenen Fahrzeugen eingesetzt werden können und dass ihr Gebrauch keine Schäden oder sonstige Nachteile (z.B. erhöhter Verbrauch oder verminderte Leistung,

verkürzte Wartungsintervalle oder erhöhter Verschleiß) zur Folge hat. Sollten doch Fahrzeugumrüstungen erforderlich sein, wird verbreitet eine finanzielle Unterstützung staatlicherseits erwartet. Um Unsicherheiten bei Fahrzeughaltern im Falle einer Nutzung synthetischer Kraftstoffe zu vermeiden, wären modellbezogene Freigaben von Seiten der Fahrzeughersteller hilfreich (Bestätigung von Eignung / Verträglichkeit synthetischer Kraftstoffe für den Motor/ das Fahrzeug, Fortbestehen von Garantie- und Gewährleistungsansprüchen).

Alle Halter und Nutzer von Straßenfahrzeugen, vom privaten Pkw-Besitzer bis zum gewerblichen Flottenbetreiber, würden von mehr Sicherheit bzgl. der zukünftigen Umstände und Bedingungen, unter denen Fahrzeuge mit den verschiedenen Antriebstechnologien zu betreiben sind, profitieren. Daher besteht ein Bedarf an widerspruchsfreier politischer Kommunikation darüber, welche Rahmenbedingungen für die zur Verfügung stehenden Fahrzeugantriebe (Verbrennungsmotor, batterieelektrischer Antrieb, H<sub>2</sub>-Brennstoffzelle) in den kommenden Jahren zu erwarten sind; z.B. hinsichtlich TCO, Lade-/Tankstellen-Infrastruktur, ggf. Nutzungseinschränkungen durch lokale Einfahrverbote usw.

#### **10.4.8 Roadmap für den Einsatz synthetischer Kraftstoffe im Straßenverkehr**

Die Ergebnisse der BEniVer-Szenarien haben gezeigt, dass E-Antriebe (batterieelektrisch bzw. Brennstoffzelle) in der Zukunft den Pkw- und Lkw-Bereich dominieren werden. Treiber hierfür sind unter anderem aktuelle Pläne zur Ausgestaltung zukünftiger CO<sub>2</sub>-Flottengrenzwerte, die bei den Szenarien-Annahmen berücksichtigt wurden. Allerdings finden sich aufgrund der langen Verweilzeit 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 durch die Kraftstoffhersteller 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 BIm-SchV 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 CO<sub>2</sub>-Emissionsbudget des gesamten Sektors von 85 Mio. Tonnen CO<sub>2</sub>-Äq. im Jahr 2030 voraussichtlich um 31 % übersteigen. Klimaneutrale, strombasierte Kraftstoffe könnten im Zuge einer **übergeordneten Defossilierungsstrategie**, und flankiert durch die Elektrifizierung der Fahrzeugflotte sowie weiteren Maßnahmen zur Verkehrsverlagerung und -vermeidung, dabei helfen die CO<sub>2</sub>-Sektorziele des deutschen Verkehrs 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.

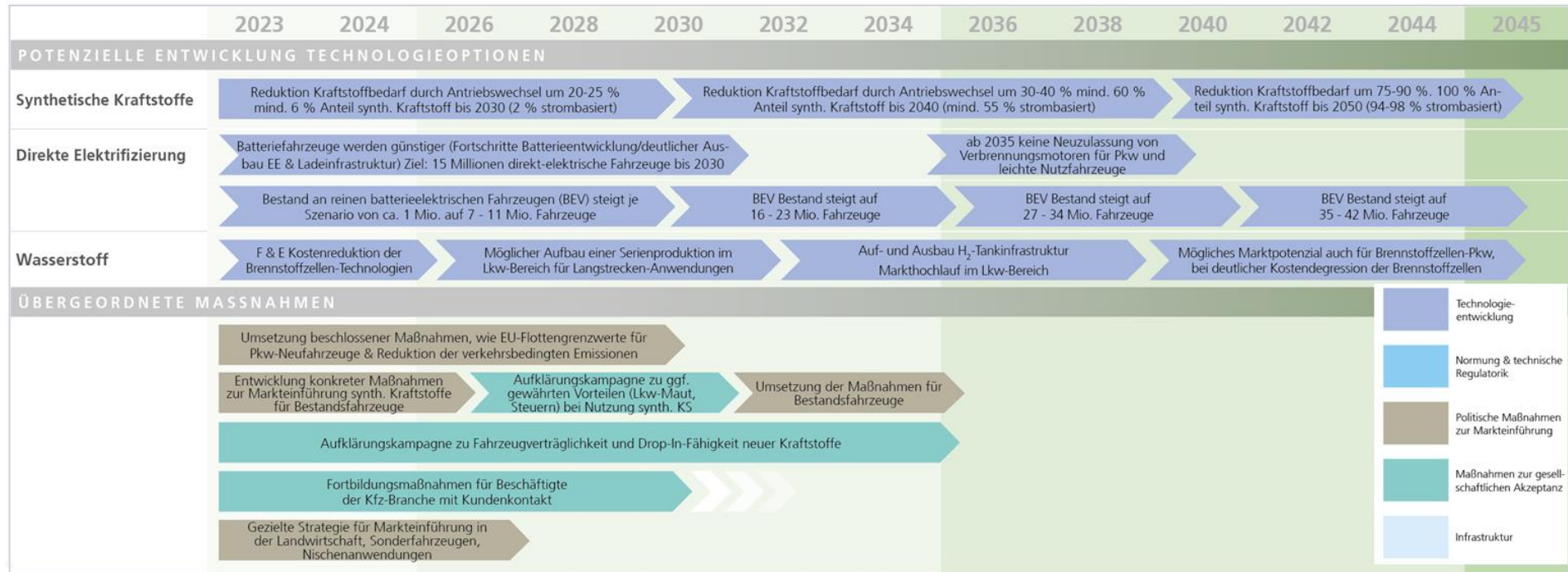


Abbildung 10-14: Roadmap im Straßenverkehr – Entwicklung Technologieoptionen und übergeordnete Maßnahmen

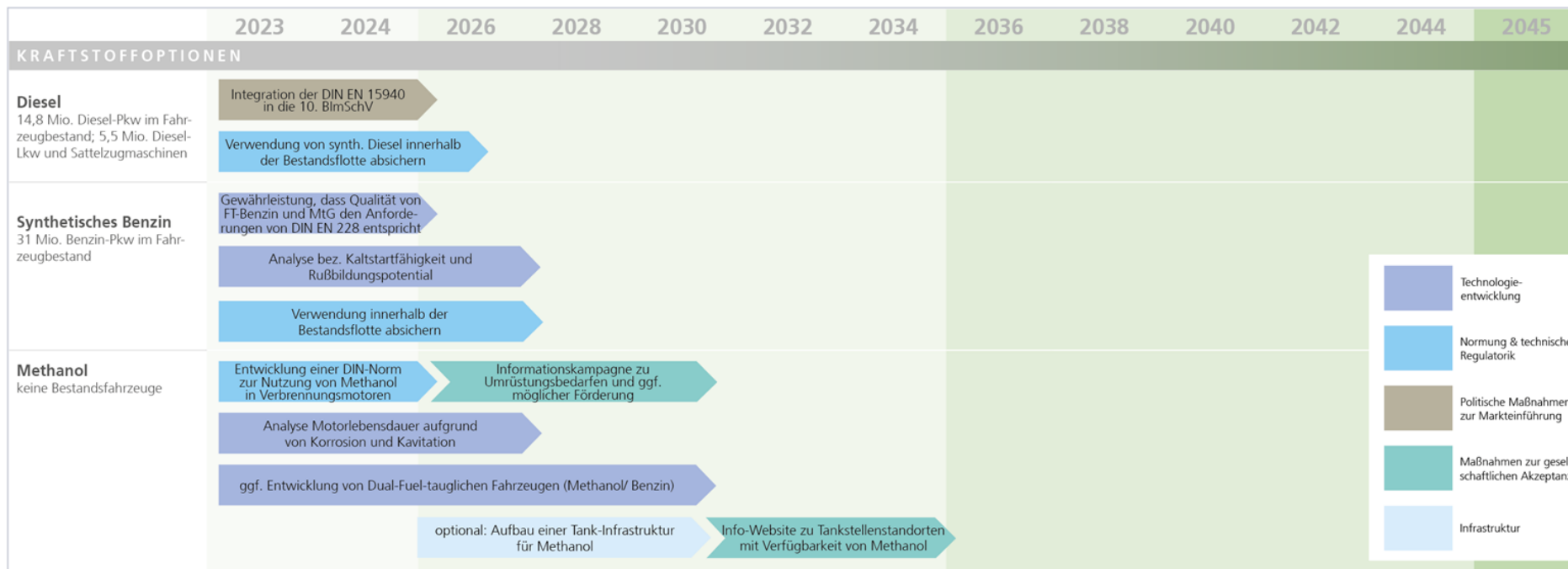


Abbildung 10-15: Roadmap im Straßenverkehr – Kraftstoffoptionen

# 11 Anhang

## 11.1 Abkürzungsverzeichnis

€	Euro
4D-Race	4-Dimensional distribution of Aircraft Emissions
ACEA	Association des Constructeurs Européens d'Automobiles
AEL	alkalische Elektrolysetechnik
AEM	Anion Exchange Membrane
AG LCA	Arbeitsgruppe Life Cycle Assessment
AGR	Abgasrückführung
aireg	Aviation initiative for renewable energy in Germany e.V.
ASTM	International, American Society for Testing and Materials
AtJ-SPK	Alcohol-to-Jet Synthetic Paraffinic Kerosene
Aus.	Australien
B/D/K	Benzin/Diesel/Kerosin
B7	Diesel nach DIN EN 590 mit 7 % <sub>vol</sub> Biodiesel-Anteil (Biodiesel = Fettsäuremethylester)
BAW	Baden-Württemberg
BAY	Bayern
BBS	Berlin, Brandenburg, Sachsen-Anhalt
BDEW	Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e.V.
BDI	Bundesverband der Deutschen Industrie e.V.
BEHG	Brennstoffemissionshandelsgesetz
BEN	BEniVer
BEN RA	BEniVer Rahmenannahmen
BEniVer	Begleitforschung für die Energiewende im Verkehr
BENOPT	BioEnergy Optimisation model
BEV	Battery Electric Vehicle – Batterieelektrisches Fahrzeug
BHKW	Blockheizkraftwerk
BImSchG	Bundes-Immissionsschutz-Gesetz
BImSchV	Bundesimmissionsschutzverordnung
BIP	Bruttoinlandsprodukt
BM	Brennstoffmix
BMBF	Bundesministerium für Bildung und Forschung
BMWK	Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz
BNS	Bremen, Niedersachsen
BoP	Balance of Plant
C	Kohlenstoff
C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> OH	Ethanol
CAN	Kanada
CAPEX	Capital Expenditure
CCUS	Carbon Capture, Utilisation and Storage
CEN	Comité Européen de Normalisation
CEPS	Central European Pipeline System
CFPP	Cold Filter Plugging Point (Filterverstopfungspunkt)
CH <sub>3</sub> OCH <sub>3</sub>	Dimethylether
CH <sub>3</sub> OH	Methanol
CH <sub>4</sub>	Methan

<b>CHL</b>	Chile
<b>CHN</b>	China
<b>CH-SK</b>	Catalytic Hydrothermolysis Synthesized Kerosene
<b>CI</b>	Chile
<b>CII</b>	Carbon Intensity Indicator
<b>CN</b>	China
<b>CNG</b>	Compressed Natural Gas
<b>CO</b>	Kohlenmonoxid
<b>CO<sub>2</sub></b>	Kohlenstoffdioxid
<b>CO<sub>2</sub>ä/km</b>	CO <sub>2</sub> -Äquivalent pro Kilometer ( <i>Einheit</i> )
<b>CO<sub>2</sub>ä/kWh</b>	CO <sub>2</sub> -Äquivalent pro Kilowattstunde ( <i>Einheit</i> )
<b>CO<sub>2</sub>Äq./km</b>	CO <sub>2</sub> -Äquivalent pro Kilometer ( <i>Einheit</i> )
<b>CO<sub>2</sub>-Äq./MWh</b>	CO <sub>2</sub> -Äquivalent pro Megawattstunde ( <i>Einheit</i> )
<b>COP</b>	Conference of the Parties (der UNFCCC)
<b>CORSIA</b>	Carbon Offsetting and Reduction Scheme for International Aviation
<b>Co-SOEC</b>	Co-Elektrolyse mit Festoxidzellen-Technologie (Solid Oxide Electrolyzer Cell)
<b>CP</b>	Cloudpoint (Trübungspunkt / Kristallisationspunkt)
<b>CSP</b>	Concentrated Solar Power
<b>ct</b>	Cent
<b>CZ</b>	Cetanzahl
<b>CZE</b>	Tschechische Republik
<b>D</b>	Diesel
<b>DAC</b>	Direct Air Capture
<b>DBFZ</b>	Deutsches Biomasseforschungszentrum
<b>DC</b>	Direct Current / Gleichstrom
<b>DE</b>	Deutschland
<b>DEL</b>	Szenario Direktelektrisch
<b>DESTATIS</b>	Deutsches Statistisches Bundesamt
<b>DEU</b>	Deutschland
<b>DIN</b>	Deutsches Institut für Normung e.V.
<b>DIN TS</b>	DIN Technische Spezifikation
<b>DIN-FAM</b>	DIN Fachausschuss Mineralöl- und Brennstoffnormung
<b>DMC</b>	Dimethylcarbonat
<b>DME</b>	Dimethylenether
<b>DOC</b>	Direct Operation Costs
<b>DWT</b>	Deadweight Tonnage / tons (Tragfähigkeit)
<b>E10</b>	Ottokraftstoff (Benzin) mit 10 % <sub>vol</sub> Ethanol
<b>E5</b>	Ottokraftstoff (Benzin) mit 5 % <sub>vol</sub> Ethanol
<b>ECA</b>	Emission control area
<b>ECHA</b>	European Chemicals Agency
<b>EE</b>	Erneuerbare Energien
<b>EEDI</b>	Energy Efficiency Design Index
<b>EEXI</b>	Energy Efficiency Existing Ship Index
<b>EFuel</b>	Electrofuel
<b>EGY</b>	Ägypten
<b>EiV</b>	Energiewende im Verkehr
<b>EJ</b>	Etajoule ( <i>Einheit</i> )
<b>el.</b>	elektrisch
<b>EnergieSt</b>	Energiesteuer
<b>EnergieStG</b>	Energiesteuer-Gesetz
<b>EP</b>	Europa

<b>EPO</b>	Europäisches Patentamt
<b>ETBE</b>	Ethyltertiärbutylether
<b>etc.</b>	et cetera
<b>EU</b>	Europäische Union
<b>EU 27</b>	Europäische Union mit 27 Mitgliedsländern
<b>EU-ETS</b>	European Union Emissions Trading System
<b>EU-MRV</b>	EU-MRV-Verordnung (Monitoring, Reporting, Verification)
<b>evtl.</b>	eventuell
<b>EWR</b>	Europäischer Wirtschaftsraum
<b>EXACT</b>	Exploration of Electric Aircraft Concepts and Technologies
<b>F&amp;E</b>	Forschung & Entwicklung
<b>FAA</b>	Federal Aviation Administration
<b>FAM</b>	Fachausschuss Mineralöl- und Brennstoffnormung
<b>FAME</b>	Fatty acid methyl ester (Fettsäuremethylester)
<b>FBP</b>	Final Boiling Point (maximale Siedetemperatur)
<b>FCEV</b>	Fuel-Cell Electric Vehicle
<b>FCI</b>	Full cost investment (Investitionsausgaben)
<b>fEE</b>	fluktuierende Erneuerbare Energien
<b>FHEV</b>	Full-Hybrid-Electric Vehicle
<b>FP</b>	Flammpunkt
<b>FQD</b>	Fuel Quality Directive
<b>FT</b>	Fischer-Tropsch (Syntheseverfahren)
<b>FT-SPK/A</b>	Fischer-Tropsch Synthetic Paraffinic Kerosene with Aromatics
<b>G</b>	Gasoline
<b>GAMS</b>	General Algebraic Modeling System, mathematisches Modell
<b>GECO 2021</b>	Global Energy and Climate Outlook 2021
<b>GEN</b>	Bezeichnung für generische Kraftstoffpfade
<b>GenH<sub>2</sub></b>	Generischer Wasserstoff
<b>GHD</b>	Gewerbe, Handel, Dienstleistungen
<b>GIS</b>	Geoinformationssystem
<b>GJ</b>	Gigajoule ( <i>Einheit</i> )
<b>GJ<sub>el</sub></b>	Gigajoule bezogen auf elektrische Energie
<b>GJ<sub>LHV</sub></b>	Gigajoule bezogen auf unteren Heizwert
<b>GS</b>	großskalig
<b>GtL</b>	Gas-to-Liquid
<b>GuD</b>	Gas- und Dampf(kraftwerksblock)
<b>GW</b>	Gigawatt ( <i>Einheit</i> )
<b>GWh/a</b>	Gigawattstunden pro Jahr ( <i>Einheit</i> )
<b>GWP</b>	Global Warming Potential(s)
<b>h</b>	Stunde ( <i>Einheit</i> )
<b>h/a</b>	Stunden pro Jahr ( <i>Einheit</i> )
<b>H<sub>2</sub></b>	Wasserstoff
<b>H<sub>2</sub>O</b>	Wasser
<b>ha</b>	Hektar ( <i>Flächenmaß</i> )
<b>HC</b>	Hydro Carbon (Kohlenwasserstoff)
<b>HCNG</b>	Hydrogen + Compressed Natural Gas (Hythan)
<b>HEFA</b>	Hydrogenated Esters and Fatty Acids
<b>HEV</b>	Hybrid Electric Vehicle
<b>HFO</b>	Heavy Fuel Oil / Schweröl

<b>HFS-SIP</b>	Hydroprocessed Fermented Sugars to Synthetic Isoparaffins
<b>HH</b>	Private Haushalte
<b>HHC-SPK</b>	Hydroprocessed Hydrocarbons, Esters and Fatty Acids Synthetic Paraffinic Kerosene
<b>HSH</b>	Hamburg, Schleswig-Holstein
<b>HT-FT</b>	Hochtemperatur-Fischer-Tropsch(-Prozess)
<b>H<sub>u</sub></b>	unterer Heizwert
<b>HVO</b>	Hydrotreated Vegetable Oil
<b>HYD</b>	Hydrogen (Wasserstoff)
<b>i.w.S.</b>	im weiteren Sinne
<b>IATA</b>	International Air Transport Association
<b>i-C<sub>4</sub>H<sub>9</sub>OH</b>	iso-Butanol
<b>ICAO</b>	International Civil Aviation Organization
<b>ICC</b>	Internal Carbon Capture
<b>ICCT</b>	International Council on Clean Transportation
<b>ICE</b>	Internal Combustion Engine
<b>IEA</b>	International Energy Agency
<b>IFO380</b>	Schiffsdiesel-Sorte
<b>ILA</b>	Internationale Luft- und Raumfahrtausstellung
<b>IMO</b>	International Maritime Organization
<b>IMPCA</b>	International Methanol Producers and Consumers Association
<b>IND</b>	Indien
<b>inkl.</b>	inklusive
<b>IO</b>	Input-Output
<b>IP</b>	Intellectual Property
<b>IPC</b>	International Patent Classification
<b>IPCC</b>	Intergovernmental Panel on Climate Change
<b>ISI</b>	Institut of Scientific Information
<b>ITA</b>	Italien
<b>Jet A-1</b>	Rohölbasiertes Kerosin
<b>JFTOT</b>	Jet Fuel Thermal Oxidation Test
<b>JP</b>	Japan
<b>JPN</b>	Japan
<b>KBA</b>	Kraftfahrt-Bundesamt
<b>KEA</b>	Kumulierter Energie-Aufwand
<b>Kfz</b>	Kraftfahrzeug
<b>Kg</b>	Kilogramm
<b>Km</b>	Kilometer
<b>KOR</b>	Südkorea
<b>KR</b>	Korea
<b>KS</b>	Kraftstoff
<b>kt/a</b>	Kilotonne pro Jahr
<b>KTW</b>	Krankentransportwagen
<b>KW</b>	Kohlenwasserstoffe
<b>kWh</b>	Kilowattstunde
<b>kWh<sub>el</sub></b>	Kilowattstunde elektrisch
<b>KWK</b>	Kraft-Wärme Kopplung
<b>L</b>	Liter ( <i>Einheit</i> )
<b>L/h</b>	Liter pro Stunde ( <i>Einheit</i> )
<b>LCA</b>	Life Cycle Assessment
<b>LCOE</b>	Levelized Costs Of Energy

<b>LCOH2</b>	Levelized Costs Of Hydrogen
<b>LENS</b>	Long-Term Energy Scenario Model
<b>LHV</b>	Energetischer Wirkungsgrad
<b>Lkw</b>	Lastkraftwagen
<b>LNF</b>	Leichte Nutzfahrzeuge
<b>LNG</b>	Liquified Natural Gas
<b>LOHC</b>	Liquid-Organic Hydrogen Carrier (flüssige organische Wasserstoff Träger)
<b>LPG</b>	Liquified Petroleum Gas
<b>LUFO</b>	Luftfahrtforschungsprogramm
<b>M</b>	Millionen
<b>M100</b>	Methanol Kraftstoff
<b>MARPOL</b>	International Convention for the Prevention of Pollution from Ships
<b>max</b>	Maximum
<b>MEA</b>	Monoethylamin
<b>MeFo</b>	Methylformiat
<b>MEM</b>	Markteinführungsmechanismen
<b>MENA</b>	Middle East, North Africa
<b>MeOH</b>	Methanol
<b>MEX</b>	Mexiko
<b>MGO</b>	Marine Gas Oil / Schiffsdiesel
<b>MHEV</b>	Mild-Hybrid-Electric Vehicle
<b>min</b>	Minimum
<b>Min.</b>	Minuten
<b>Mio.</b>	Millionen
<b>MJ/kg</b>	Megajoule pro Kilogramm ( <i>Einheit</i> )
<b>MJ/km</b>	Megajoule pro Kilometer ( <i>Einheit</i> )
<b>MJ/l</b>	Megajoule pro Liter ( <i>Einheit</i> )
<b>MKS</b>	Bezeichnung von Kraftstoffpfaden in BEniVer
<b>MOZ</b>	Motor-Oktanzahl
<b>Mrd.</b>	Milliarden
<b>Mt</b>	Megatonnen ( <i>Einheit</i> )
<b>MTBE</b>	Methyltertiärbutylether
<b>MtG</b>	Methanol-to-Gasoline
<b>MtJ</b>	Methanol-to-Jet
<b>MtK</b>	Methanol-to-Kerosene
<b>MtO</b>	Methanol-to-Olefins
<b>MTP</b>	Methanol-to-Propylene
<b>MuSeKo</b>	Multi-Sektor-Kopplung
<b>MVA</b>	Müllverbrennungsanlage
<b>MVP</b>	Mecklenburg-Vorpommern
<b>MW</b>	Megawatt ( <i>Einheit</i> )
<b>MWh</b>	Megawattstunden ( <i>Einheit</i> )
<b>MWh<sub>chem</sub></b>	Megawattstunden bezogen auf chemische Energie
<b>MWSt</b>	Mehrwertsteuer
<b>MZ</b>	Methanzahl
<b>η</b>	Wirkungsgrad
<b>N<sub>2</sub></b>	Stickstoff
<b>N<sub>2</sub>O</b>	Lachgas (Distickstoffmonoxid)
<b>NATO</b>	North Atlantic Treaty Organization



<b>NGO</b>	Non-Governmental Organization
<b>NH<sub>3</sub></b>	Ammoniak
<b>nm</b>	Nautische Meilen
<b>NO<sub>x</sub></b>	Stickstoffoxide
<b>NPC</b>	Net Present Cost
<b>NPM</b>	Nationale Plattform Zukunft der Mobilität (unabhängiges Expertengremium)
<b>NPO</b>	Non-Profit Organization
<b>NRW</b>	Nordrhein-Westfalen
<b>NT-FT</b>	Niedertemperatur-Fischer-Tropsch(-Prozess)
<b>NWR</b>	Nationaler Wasserstoffrat
<b>o.g.</b>	oben genannt
<b>OECD</b>	Organisation for Economic Co-operation and Development
<b>OEM</b>	Original Equipment Manufacturer
<b>OME</b>	Oxymethylenether
<b>OPEC</b>	Organization of Petroleum Exporting Countries (Verband der öl-exportierenden Länder)
<b>OPEX</b>	Operational Expenses
<b>OTF</b>	Over the Fence
<b>P</b>	Leistung
<b>p.a.</b>	per annum, jährlich
<b>PEM</b>	Proton Exchange Membrane
<b>PHEV</b>	Plug-in Hybrid Electric Vehicle
<b>PIK</b>	Potsdam Institut für Klimafolgenforschung
<b>PJ</b>	Petajoule
<b>Pkm</b>	Personenkilometer ( <i>Einheit</i> )
<b>Pkw</b>	Personenkraftwagen
<b>P<sub>min</sub></b>	Minimalleistung
<b>PtL</b>	Power-to-Liquid
<b>PtX</b>	Power-to-X
<b>PV</b>	Photovoltaik
<b>RA</b>	Rahmenannahmen
<b>REACH</b>	Registration, Evaluation, Authorisation and Restriction of Chemicals
<b>RED II/III</b>	Renewable Energy Directive II/III
<b>REF</b>	Referenz-Szenario
<b>REMix</b>	Renewable Energy Mix
<b>RFNBO</b>	Renewable Fuels of Non-Biological Origin
<b>RoW</b>	Rest of World
<b>ROZ</b>	Research-Oktanzahl
<b>rWGS</b>	Reverse Wasser-Gas-Shift (chemische Reduktion mit H <sub>2</sub> zu CO)
<b>SAF</b>	Sustainable Aviation Fuels
<b>SAU</b>	Saudi-Arabien
<b>SDGs</b>	Sustainable Development Goals der Vereinten Nationen (UN)
<b>SEEMP</b>	Ship Energy Efficiency Management Plan
<b>SNF</b>	Schwere Nutzfahrzeuge
<b>SO<sub>2</sub></b>	Schwefeldioxid-Emissionen
<b>SOEC</b>	Hochtemperatur Festoxid (SOEC) Elektrolyse
<b>SO<sub>x</sub></b>	Schwefeloxid
<b>Spa</b>	Spanien
<b>SPK</b>	Synthetic Paraffinic Kerosene
<b>SRH</b>	Saarland, Rheinland.Pfalz, Hessen
<b>Std.</b>	Stunden

<b>Syn</b>	Synthetic
<b>SynFuel</b>	Synthetic Fuel
<b>t</b>	Tonne ( <i>Einheit</i> )
<b>t/a</b>	Tonnen pro Jahr ( <i>Einheit</i> )
<b>t/d</b>	Tonnen pro Tag ( <i>Einheit</i> )
<b>T<sub>b</sub></b>	Siedetemperatur
<b>TCO</b>	Total Cost of Ownership
<b>T<sub>f</sub></b>	Gefriertemperatur
<b>THG</b>	Treibhausgase
<b>THG100</b>	Szenario mit Reduktion der Treibhausgase um 100%
<b>THG80</b>	Szenario mit Reduktion der Treibhausgase um 80%
<b>THS</b>	Thüringen, Sachsen
<b>THW</b>	Technisches Hilfswerk
<b>TIS</b>	technologisches Innovationssystem
<b>TÖA</b>	Techno-ökonomische Analyse
<b>TRL</b>	Technology Readiness Level (Technologie-Reifegrad)
<b>TTW</b>	Tank to Wheel (Wirkungsgrad von Autos)
<b>TWh</b>	Terawattstunden
<b>u. a.</b>	und andere / unter anderem
<b>u. U.</b>	unter Umständen
<b>UBA</b>	Umweltbundesamt
<b>UFZ</b>	Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung
<b>UN</b>	United Nations (Vereinte Nationen)
<b>US</b>	United States of America
<b>USA</b>	United States of America
<b>USD</b>	United States Dollar
<b>v. a.</b>	vor allem
<b>VBS</b>	Vollbenutzungsstunden
<b>VDA</b>	Verband der Automobilindustrie e.V.
<b>VECTOR21</b>	Vehicle Technology Scenario Model
<b>Vgl.</b>	Vergleich
<b>VLSFO</b>	Very Low Sulphur Fuel Oil, Schiffsdiesel
<b>VOC</b>	volatile organic components
<b>Vol.</b>	Volumen
<b>WACC</b>	Weighted Average Cost of Capital, durchschnittliche Kapitalkosten
<b>WLTP</b>	World-wide Harmonized Light-Duty Vehicles Test Procedure
<b>WO</b>	World
<b>WZ</b>	Wirtschaftszweig
<b>Y<sub>c</sub></b>	Kohlenstoffausbeute im Gesamtprozess
<b>z.B.</b>	zum Beispiel
<b>z.GG.</b>	zulässiges Gesamtgewicht
<b>Z<sub>c</sub></b>	Kohlenstoffausbeute im Zielfuel
<b>Zem.</b>	Zement(-Herstellung)

## 11.2 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1-1: Forschungsbereiche und fokussierte Verkehrsbereiche der Eiv-Verbünde.....	11
Abbildung 1-2: Über 100 Partner aus Industrie, Hochschulen und Forschungseinrichtungen waren in der Forschungsinitiative Eiv beteiligt.....	12
Abbildung 1-3: Struktur der Zusammenarbeit in der Begleitforschung Eiv .....	13
Abbildung 2-1: Eigenschaften von Kraftstoffpfaden.....	21
Abbildung 2-2: Kraftstoff-Lebenszyklus .....	28
Abbildung 2-3: Schematische Darstellung der TÖA-Methodik .....	31
Abbildung 4-1: Energetischer Wirkungsgrad der generischen Kraftstoffherstellungsprozesse   B/D/K = Benzin, Diesel und Kerosin aus der Fischer-Tropsch-Synthese .....	94
Abbildung 4-2: Kostenzusammensetzung von Wasserstoff je nach Elektrolysetechnologie und Stützjahr .....	95
Abbildung 4-3: Kostenzusammensetzung von CO <sub>2</sub> je nach Bereitstellungsart und Stützjahr.....	96
Abbildung 4-4: Kraftstoffgestehungskosten der Referenzpfade   B/D/K = Benzin, Diesel und Kerosin via Fischer-Tropsch-Synthese .....	97
Abbildung 4-5: Kraftstoffgestehungskosten generisches Methanol mit Variation der C-, H- und Stromquelle .....	100
Abbildung 4-6: Treibhausgasemissionen pro Kilometer über den gesamten Lebenszyklus, Bereich Pkw.....	128
Abbildung 4-7: THG-Emissionen pro Kilometer über den gesamten Lebenszyklus, Bereich leichte Nutzfahrzeuge.....	132
Abbildung 4-8: THG-Emissionen pro Kilometer über den gesamten Lebenszyklus, Bereich schwere Nutzfahrzeuge.....	134
Abbildung 4-9: THG-Emissionen pro Kilometer über den gesamten Lebenszyklus, Bereich Schifffahrt.....	136
Abbildung 4-10: THG-Emissionen pro Kilometer über den gesamten Lebenszyklus, Bereich Luftfahrt; SAF 50 = 50 %Vol. SAF + 50 %Vol. fossiles Kerosin; SAF 100: 100 % SAF .....	138
Abbildung 4-11: THG-Emissionen Sensitivitätsanalyse für synthetisches Benzin im Pkw ...	142

Abbildung 4-12: Einordnung der Ergebnisse für synthetisches Benzin im Pkw. Anpassung der prospektiven Hintergrunddatenbank und Vergleich mit einem Elektroauto, fossilem Benzin und einem Brennstoffzellen-Fahrzeug.....	143
Abbildung 5-1: Übersicht über Gestehungskosten aller großskaligen Pfade   Laufzeit von 8.000 h/a und je minimale Werte (teuerster Pfad im Jahr 2018 nicht dargestellt) .....	169
Abbildung 5-2: Gestehungskosten der Methanpfade.....	170
Abbildung 5-3: Gestehungskosten der Kohlenwasserstoffpfade.....	171
Abbildung 5-4: Gestehungskosten der Methanol- und DME-Pfade.....	172
Abbildung 5-5: Gestehungskosten der Oxygenate auf Methanolbasis.....	173
Abbildung 5-6: Kosten und Klimawirkung verschiedener Kraftstoffe bei der Nutzung im Pkw .....	204
Abbildung 5-7: Kosten und Klimawirkung von Kraftstoffen bei der Nutzung in schweren Nutzfahrzeugen .....	205
Abbildung 5-8: Kosten und Klimawirkung von Kraftstoffen bei der Nutzung in leichten Nutzfahrzeugen .....	205
Abbildung 5-9: Kosten und Klimawirkung von Kraftstoffen bei der Nutzung in der Schifffahrt.....	206
Abbildung 5-10: Kosten und Klimawirkung von Kerosin im Bereich Luftfahrt .....	207
Abbildung 6-1: Übersicht der in BEniVer verwendeten makroskopischen Modelle sowie deren Verknüpfung untereinander (Verkehr und Energie) .....	229
Abbildung 6-2: Übersicht der wichtigsten Rahmenannahmen der Pkw- und Lkw-Szenarien in VECTOR21.....	232
Abbildung 6-3: Simulierte Marktpotenziale für alternative Antriebe von Pkw-Neuzulassungen bis 2050 (2. Simulationslauf, Stand 03.2022): REF .....	237
Abbildung 6-4: Simulierte Marktpotenziale für alternative Antriebe von Pkw-Neuzulassungen bis 2050 (2. Simulationslauf, Stand 03.2022): PtX.....	238
Abbildung 6-5: Simulierte Marktpotenziale für alternative Antriebe von Pkw-Neuzulassungen bis 2050 (2. Simulationslauf, Stand 03.2022): H2.....	238
Abbildung 6-6: Simulierte Marktpotenziale für alternative Antriebe von Pkw-Neuzulassungen bis 2050 (2. Simulationslauf, Stand 03.2022): DEL .....	239

Abbildung 6-7: Energiebedarfe des Pkw-Bereichs in den verschiedenen BEniVer-Szenarien bis 2045 (2. Simulationslauf, Stand 03.2022).....	240
Abbildung 6-8: Simulierte Marktpotenziale für alternative Antriebe von Lkw-Neuzulassungen bis 2050 (2. Simulationslauf, Stand 05.2022): REF .....	241
Abbildung 6-9: Simulierte Marktpotenziale für alternative Antriebe von Lkw-Neuzulassungen bis 2050 (2. Simulationslauf, Stand 05.2022): PtX.....	241
Abbildung 6-10: Simulierte Marktpotenziale für alternative Antriebe von Lkw-Neuzulassungen bis 2050 (2. Simulationslauf, Stand 05.2022): H2 .....	242
Abbildung 6-11: Simulierte Marktpotenziale für alternative Antriebe von Lkw-Neuzulassungen bis 2050 (2. Simulationslauf, Stand 05.2022): DEL.....	243
Abbildung 6-12: Energiebedarfe des Lkw-Bereichs in den verschiedenen BEniVer-Szenarien bis 2045 (2. Simulationslauf, Stand 03.2022) .....	243
Abbildung 6-13: Sensitivität des Energiebedarfes der Pkw- und Lkw-Flotte bei +10 % Fahrleistungsanstieg sowie -10 % Fahrleistungsverringerng .....	245
Abbildung 6-14: Simulierte Marktpotenziale für alternative Antriebe von Pkw-Neuzulassungen bis 2050 ohne Begrenzung der verfügbaren Zertifikate (Sensitivitätstest, Stand 09.2022): PtX .....	245
Abbildung 6-15: Überschlägig berechneter Kraftstoffbedarf von Sonderfahrzeugen und Nischenanwendungen in Deutschland.....	248
Abbildung 6-16: Treibstoffverbrauchsszenario des Luftverkehrs in Europa (EU27) 2019-2050 .....	251
Abbildung 6-17: Energiebedarf des Transportsektors im DEL-Szenario .....	252
Abbildung 6-18: Energiebedarf des Transportsektors im H2-Szenario.....	253
Abbildung 6-19: Energiebedarf des Transportsektors im PtX-Szenario .....	253
Abbildung 6-20: Kraftstoffe nach Quellen im DEL-Szenario in Mio Tonnen .....	254
Abbildung 6-21: Kraftstoffe nach Quellen im H <sub>2</sub> -Szenario in Mio Tonnen .....	255
Abbildung 6-22: Kraftstoffe nach Quellen im PtX-Szenario in Mio. Tonnen.....	255
Abbildung 6-23: Beimischungsquoten in den verschiedenen Verkehrsbereichen .....	256
Abbildung 6-24: Strombasierte Kraftstoffe nach Verkehrsbereich im DEL-Szenario in Mio. Tonnen pro Jahr .....	257

Abbildung 6-25: Strombasierte Kraftstoffe nach Verkehrsbereichen im H <sub>2</sub> -Szenario in Mio. Tonnen pro Jahr .....	258
Abbildung 6-26: Strombasierte Kraftstoffe nach Verkehrsbereichen im PtX-Szenario in Mio. Tonnen pro Jahr .....	259
Abbildung 6-27: Jährlicher Kraftstoffbedarf der verschiedenen Verkehrsbereiche in Deutschland gemäß BEniVer-Klimaneutralitätsszenarien .....	260
Abbildung 6-28: Bedarf an aus erneuerbarem Strom erzeugten Kraftstoffen für Deutschland im PtX-Szenario .....	262
Abbildung 6-29: Bedarf an aus erneuerbarem Strom erzeugten Kraftstoffen für Deutschland im H <sub>2</sub> -Szenario .....	263
Abbildung 6-30: Kraftstoffbedarf für Deutschland im DEL-Szenario.....	263
Abbildung 6-31: Geographische Bezüge (Scopes) der REMix-Rechnungen und Bezeichnungen der Modellregionen. ....	265
Abbildung 6-32: Modellierte Stromnachfrage differenziert nach klassischer Endenergienachfrage, Strombedarf für neue direktelektrische Anwendungen und Strombedarf für die Erzeugung gasförmiger oder flüssiger synthetischer Energieträger.....	266
Abbildung 6-33: Zubau an Photovoltaik sowie Windkraftanlagen an Land und auf See aggregiert für Deutschland in GW installierte Nennleistung. ....	268
Abbildung 6-34: Notwendige Kapazitäten für EE-Strom in Deutschland, regional verteilt (Bezeichnung der Modellknoten vgl. Abbildung 6-31) in den vier Szenarien. Gezeigt sind nur die drei wesentlichen EE-Technologien Photovoltaik, Wind an Land und Wind auf See.....	271
Abbildung 6-35: Regionale Verteilung der Produktionskapazitäten von Wasserstoff, synthetischem Methan und synthetischen, flüssigen Kraftstoffen. Bezeichnungen der Modellknoten vgl. Abbildung 6-31. ....	273
Abbildung 6-36: Details der Modellkopplung REMix-BENOPT inkl. der drei Modelle VECTOR21, 4DRACE und LENS.....	277
Abbildung 6-37: Die Entwicklung des Kraftstoffbedarfs und möglicher Aufteilungen in biogene und direktelektrische Quellen in Deutschland in den Szenarien REF (oben) und PtX (unten). Für Annahmen zu den biogenen Quellen (siehe Tabelle 6-6). Auf der rechten Seite der Grafik sind für die verbleibenden Nachfragen nach nicht-biogenen, synthetischen Kraftstoffen außerdem die jeweils kostenminimale Herstellung in Deutschland sowie der Import nach Deutschland über alle flüssigen Kraftstoffe summiert angegeben. ....	278

Abbildung 6-38: Entwicklung der Stromnachfrage nach Abzug biogener Kraftstoffe für die Szenarien REF und PtX, differenziert nach klassischer Endenergienachfrage, Strombedarf für neue direktelektrifizierte Anwendungen und Strombedarfe für die Erzeugung gasförmiger und flüssiger, synthetischer Energieträger.....	279
Abbildung 6-39: Kostenoptimaler Zubau an Photovoltaik sowie Windkraftanlagen an Land und auf See, aggregiert in Deutschland, in GW installierte Nennleistung für die Szenarien REF und PtX unter Berücksichtigung des Biokraftstoffeinsatzes. Die gestrichelten Linien markieren den angenommenen Zubau im Netzentwicklungsplan, der hier als Maximum angesetzt wird. In Hellblau sind jeweils die aus den Vorjahren zugebauten Kapazitäten angegeben, die zu Beginn der Optimierung verfügbar sind. In Dunkelblau wird der Zubau im jeweiligen Jahr angegeben. ....	280
Abbildung 6-40: Investitionen in das Energiesystem Deutschlands für ausgewählte Technologien in Milliarden Euro .....	283
Abbildung 6-41: Pkw-Exporte nach Antriebsart in allen Szenarien in Milliarden Euro <sub>2020</sub> ....	285
Abbildung 6-42: Lkw-Exporte nach Antriebsart in allen Szenarien in Milliarden Euro.....	286
Abbildung 6-43: Außenhandelsverflechtungen für Synthesetechnologien im Zeitraum 2020-2070 auf Grundlage des MENA-Fuels Brennstoffmix-Szenarios (BM-REF). Richtung der Handelsflüsse: von links nach rechts, RoW: Rest of World.....	287
Abbildung 6-44: Exporte von Energietechnologien in Milliarden Euro für alle Szenarien .....	288
Abbildung 6-45: Relative Differenzen des BIP in den Zielszenarien DEL, H2 und PtX von der REF-Entwicklung.....	290
Abbildung 6-46: Entwicklung der Beschäftigung im Wirtschaftszweig (WZ) „Herstellung von Kraftwagen und Kraftwagenteilen“ und Abweichungen in den Zielszenarien DEL, H2 und PtX von der REF-Entwicklung für die Jahre 2030, 2040 und 2050 .....	292
Abbildung 7-1: Patentanmeldungen für Ethanol und Methanol gesamt und mit Anwendungsbezug „Fahrzeug“ im Vergleich, 2000-2020 .....	298
Abbildung 7-2: Patentanmeldungen für OME / DME, synthetischen Diesel, synthetisches Benzin, synthetisches Kerosin und Ammoniak gesamt und mit Anwendungsbezug „Fahrzeug“ im Vergleich, 2000-2020.....	299
Abbildung 7-3: Trendentwicklung Patentanmeldungen „Methanol“ und „Methanol in der Fahrzeuganwendung“, 2000-2020.....	300

Abbildung 7-4: Technologieführer im Bereich Methanol, Top 10-Ranking nach Patentanmeldungen .....	301
Abbildung 7-5: Relevanz der Patentmärkte im Bereich Methanol, Anteil geografischer Schutzrechtsansprüche .....	302
Abbildung 7-6: Benchmark der F&E-Anteile bei Patentanmeldungen im Bereich Methanol im internationalen Vergleich, 2000-2020 .....	303
Abbildung 7-7: Trendentwicklung Patentanmeldungen Ammoniak und Ammoniak in der Fahrzeuganwendung, 2000-2020 .....	304
Abbildung 7-8: Technologieführer im Bereich Ammoniak, Top 10-Ranking nach Patentanmeldungen .....	305
Abbildung 7-9: Relevanz der Patentmärkte im Bereich Ammoniak, Anteil geografischer Schutzrechtsansprüche .....	306
Abbildung 7-10: Benchmark der F&E-Anteile bei Patentanmeldungen im Bereich Ammoniak im internationalen Vergleich, 2000-2020 .....	307
Abbildung 7-11: Trendentwicklung Patentanmeldungen DME und DME in der Fahrzeuganwendung, 2000-2020 .....	308
Abbildung 7-12: Technologieführer im Bereich DME, Top 10-Ranking nach Patentanmeldungen .....	309
Abbildung 7-13: Relevanz der Patentmärkte im Bereich DME, Anteil geografischer Schutzrechtsansprüche .....	310
Abbildung 7-14: Benchmark der F&E-Anteile bei Patentanmeldungen im Bereich DME im internationalen Vergleich, 2000-2020 .....	311
Abbildung 7-15: Trendentwicklung Patentanmeldungen Synthetisches Kerosin und Synthetisches Kerosin in der Fahrzeuganwendung, 2000-2020 .....	312
Abbildung 7-16: Technologieführer im Bereich Synthetisches Kerosin, Top10-Ranking nach Patentanmeldungen .....	313
Abbildung 7-17: Relevanz der Patentmärkte im Bereich Synthetisches Kerosin, Anteil geografischer Schutzrechtsansprüche.....	314
Abbildung 7-18: Benchmark der F&E-Anteile bei Patentanmeldungen im Bereich Synthetisches Kerosin im internationalen Vergleich, 2000-2020.....	315



Abbildung 7-19: Anzahl jährliche, auf Scopus veröffentlichte Publikationen für synthetisches Kerosin, Benzin und Diesel. Jeweils gesamt sowie mit Anwendungsbezug Fahrzeug im Vergleich für die Jahre 2000-2020. ....	319
Abbildung 7-20: Anzahl jährliche auf Scopus veröffentlichte Publikationen für Ethanol, Methanol, Methan und Ammoniak. Jeweils gesamt sowie mit Anwendungsbezug Fahrzeug im Vergleich für die Jahre 2000-2020. ....	320
Abbildung 7-21: Anzahl jährliche auf Scopus veröffentlichte Publikationen für synthetisches Ethanol, Methanol, Methan und Ammoniak. Jeweils gesamt sowie mit Anwendungsbezug Fahrzeug („vehicle“) im Vergleich für die Jahre 2000-2020. ....	321
Abbildung 7-22: Anzahl jährliche auf Scopus veröffentlichte Publikationen für OME, DMC und DME. Jeweils gesamt sowie mit Anwendungsbezug Fahrzeug im Vergleich für die Jahre 2000-2020. ....	321
Abbildung 7-23: Anzahl jährliche auf Scopus veröffentlichte Publikationen für Wasserstoff und synthetischen bzw. grünen Wasserstoff. Jeweils gesamt sowie mit Anwendungsbezug Fahrzeug im Vergleich für die Jahre 2000-2020. ....	322
Abbildung 7-24: Benchmark der F&E-Anteile bei anwendungsorientierten Scopus-Veröffentlichungen im Bereich Ethanol, Methanol, Methan und Wasserstoff im internationalen Vergleich, 2000-2020. ....	324
Abbildung 7-25: Bilanzraum der Kraftstoffproduktionsanlage. ....	326
Abbildung 7-26: Wasserstoffgestehungskosten auf Basis der Standortanalysen. ....	327
Abbildung 7-27: Standortanalyse der Methanolgestehungskosten für das Jahr 2030. ....	328
Abbildung 8-1: Betrachtete Akteursgruppen im Mehrebenensystem. ....	331
Abbildung 8-2: Häufigkeit der Begriffsverwendungen (N= 334 Artikel). Die Zahlen über den Säulen geben die absoluten Nennungen an (in Summe 537 Begriffs-nennungen). ....	335
Abbildung 8-3: Kontexte, mit denen das Thema synthetische Kraftstoffe verknüpft wird (dargestellt als prozentualer Anteil der Artikel mit Kontextvorkommen an Gesamtartikelzahl von N= 334). ....	336
Abbildung 8-4: Argumente der Akteursgruppen Wirtschaft, Politik und Wissenschaft pro und contra synthetische Kraftstoffe in analysierten Zeitungsartikeln; nach Clustern geordnet. ....	338
Abbildung 8-5: Von den Verbundprojekten genannte Akzeptanzfaktoren (kategorisierte Antworten), gruppiert nach Anwendung (hellblau), Umwelt (dunkelblau) und Ökonomie (grau). ....	339

Abbildung 8-6: Nach welchen alternativen Antrieben fragen / informieren sich Kunden in den Kfz-Betrieben? .....	340
Abbildung 8-7: Wie groß ist die Bereitschaft, zukünftig in betriebseigenen Fahrzeugen synthetische Kraftstoffe zu nutzen? .....	341
Abbildung 8-8: Relevanz der Akzeptanzfaktoren für unterschiedliche Nutzengruppen.....	357
Abbildung 8-9: Bewertung der generischen Kraftstoffpfade anhand der ausgewerteten Akzeptanzfaktoren.....	358
Abbildung 9-1: Kriterienraster für die Entwicklung von Markteinführungsmechanismen ....	360
Abbildung 9-2: (Typische) Akteursstruktur eines TIS.....	364
Abbildung 9-3: das Spektrum möglicher Markteinführungsmechanismen.....	368
Abbildung 9-4: Mineralölverbrauch in Mio. t (es bestehen rundungsbedingte Differenzen) in der Bundesrepublik Deutschland im Jahr 2019.....	369
Abbildung 9-5: Ölförder- und -nutzerländer weltweit (Stand 2022) .....	370
Abbildung 9-6: EU-ETS-Zertifikatspreise.....	374
Abbildung 9-7: Preisbestandteile für E5 im Verlauf des Jahres 2021 .....	375
Abbildung 9-8: Konsumentenpreise für Ölprodukte ohne Abgaben und Steuern für die EU27 (gewichteter Durchschnitt) .....	376
Abbildung 9-9: Weltweit installierte Leistung erneuerbarer Energien zur Stromerzeugung und Anteil von Windkraft und Photovoltaik.....	377
Abbildung 9-10: Weltweit jährlicher Zuwachs an erneuerbaren Energien zur Stromerzeugung .....	378
Abbildung 9-11: Strombedarf für Elektrizität und Kraftstoffe aus erneuerbaren Energien .....	379
Abbildung 9-12: Installierte EE-Leistung zur Stromerzeugung nach Kontinenten .....	380
Abbildung 9-13: Anteil der EE an der Stromerzeugung nach Kontinenten .....	381
Abbildung 9-14: Installierte EE-Leistung zur Stromerzeugung für ausgewählte Länder .....	381

Abbildung 9-15: Anteil der EE an der Stromerzeugung für ausgewählte Länder .....	382
Abbildung 9-16: Vergleich Wasserstoffproduktionsziele und angekündigter Wasserstoff- und Ammoniakprojekte mit IEA-Net-Zero-Menge und dem Importziel der EU .....	384
Abbildung 9-17: Entwicklung von Markteinführungsmechanismen .....	406
Abbildung 9-18: Schema einer möglichen Marktentwicklung und korrespondierender Einsatz von Markteinführungsmechanismen .....	416
Abbildung 10-1: Kraftstoffbedarf nach Verkehrsbereichen für das DEL-Szenario .....	419
Abbildung 10-2: Kraftstoffbedarf nach Verkehrsbereichen für das H2-Szenario .....	419
Abbildung 10-3: Kraftstoffbedarf nach Verkehrsbereichen für das PtX-Szenario .....	419
Abbildung 10-4: Bedarf an strombasierten Kraftstoffen und angekündigte Produktionskapazität in ausgewählten Projekten.....	420
Abbildung 10-5: Roadmap zum Produktionshochlauf und zur Markteinführung synthetischer Kraftstoffe.....	431
Abbildung 10-6: Treibstoffverbrauch des Luftverkehrs in Deutschland entsprechend der BEniVer-Szenarien (ohne Berücksichtigung Covid-Effekt).....	433
Abbildung 10-7: Roadmap in der Luftfahrt – Entwicklung Technologieoptionen und Internationale Roadmap für den Einsatz von SAF .....	444
Abbildung 10-8: Roadmap in der Luftfahrt – Europäische und Nationale Roadmap für den Einsatz von SAF .....	445
Abbildung 10-9: Roadmap in der Schifffahrt – Entwicklung Technologieoptionen und übergeordnete Maßnahmen .....	460
Abbildung 10-10: Roadmap in der Schifffahrt – Kraftstoffoptionen.....	461
Abbildung 10-11: Kraftstoffbedarf des Pkw-Bereichs in Deutschland gemäß BEniVer-Szenarien-Modellierung (Benzin und Diesel aufsummiert) .....	464
Abbildung 10-12: Kraftstoffbedarf des Lkw-Bereichs in Deutschland gemäß BEniVer-Szenarien-Modellierung.....	464
Abbildung 10-13: Vergleich der jährlichen Kraftstoffnachfrage von Pkw und Lkw auf Basis der VECTOR21 Ergebnisse für die verschiedenen BEniVer Szenarien mit dem abgeschätzten jährlichen Kraftstoffbedarf von Landwirtschaft und Sonderfahrzeugen.....	466

---

Abbildung 10-14: Roadmap im Straßenverkehr – Entwicklung Technologieoptionen und übergeordnete Maßnahmen .....	480
Abbildung 10-15: Roadmap im Straßenverkehr – Kraftstoffoptionen .....	481

## 11.3 Tabellenverzeichnis

Tabelle 2-1:	Weitere allgemeingültige Annahmen für Kraftstoffproduktionsanlagen .....	22
Tabelle 2-2:	Rahmenannahmen für die generische Stromquelle .....	23
Tabelle 2-3:	Rahmenannahmen für die generische Wasserstoffquelle (großskalig) .....	24
Tabelle 2-4:	Anteilige Zusammensetzung des generischen CO <sub>2</sub> .....	24
Tabelle 2-5:	Rahmenannahmen für die generische Kohlenstoffquelle (großskalig) .....	25
Tabelle 2-6:	Generische Referenzpfade für synthetische Kraftstoffe .....	32
Tabelle 2-7:	Fossile und biogene Kraftstoffreferenzen .....	33
Tabelle 2-8:	Spezifische Kraftstoffpfade der EIV-Verbundvorhaben .....	34
Tabelle 2-9:	Übersicht der in BEniVer betrachteten Kraftstoffe mit ihrer Einordnung in Sektoren.....	37
Tabelle 2-10:	Übersicht der in BEniVer betrachteten Kraftstoffe und deren für die Anwendung relevante Kraftstoffeigenschaften.....	38
Tabelle 2-11:	Definition der Drop-In-Fähigkeit von synthetischen Kraftstoffen und Kraftstoffblends für Kraftstoffe des bodengebundenen Verkehrs; gilt analog auch für die Schifffahrt und synthetische Treibstoffe der Luftfahrt .....	39
Tabelle 2-12:	Übersicht zu den strombasierten Kraftstoffen für die Anwendung im Straßenverkehr und ihren Beimischungsgrenzen gemäß heutiger Normen .....	42
Tabelle 2-13:	Übersicht zu den strombasierten Treibstoffen für die Luftfahrt und deren Beimischungsgrenzen (SAF = Sustainable Aviation Fuel, SPK = Synthetic Paraffinic Kerosene) .....	46
Tabelle 2-14:	Übersicht zu den strombasierten Kraftstoffen in der Schifffahrt und deren Beimischungsgrenzen .....	48
Tabelle 3-1:	Übersicht der Bewertungskriterien.....	51
Tabelle 3-2:	Qualitative Beschreibung der Bewertungsmetrik .....	52
Tabelle 3-3:	Bewertungsmetrik für das Energiesystem.....	55
Tabelle 3-4:	Bewertungsmetrik für die techno-ökonom. Bewertung der Herstellungsprozesse .....	57

Tabelle 3-5:	Definition der Skala für die Bewertung der Kraftstoffeigenschaften je Bewertungskriterium.....	60
Tabelle 3-6:	Zusammenstellung der Indikatoren bzw. Eigenschaften und deren Wichtigung, wie sie in die Bewertung der Umwelteigenschaften (Bewertungskriterium 1) einfließen .....	62
Tabelle 3-7:	Zusammenstellung der Indikatoren bzw. Eigenschaften und deren Wichtigung, wie sie in die Bewertung des Energieinhaltes (Bewertungskriterium 2) einfließen .....	64
Tabelle 3-8:	Zusammenstellung der Indikatoren bzw. Eigenschaften und deren Wichtigung, wie sie in die Bewertung des Bereiches Sicherheit und Handhabung einfließen .....	66
Tabelle 3-9:	Zusammenstellung der Indikatoren bzw. Eigenschaften und deren Wichtigung, wie sie in die Bewertung der Kompatibilität mit Normen und Regularien einfließen.....	67
Tabelle 3-10:	Zusammenstellung der Indikatoren bzw. Eigenschaften und deren Wichtigung, wie sie in die Bewertung der technischen Kompatibilität einfließen.....	68
Tabelle 3-11:	Bewertungsmetrik des Kriteriums 1: Kosten der Fahrzeughaltung.....	70
Tabelle 3-12:	Bewertungsmetrik des Kriteriums 2: Tankvorgang.....	70
Tabelle 3-13:	Bewertungsmetrik des Kriteriums 3: Tankinfrastruktur.....	71
Tabelle 3-14:	Bewertungsskala für THG-Emissionen. Die THG-Emissionen entsprechen jeweils der unteren Grenze der jeweiligen Bewertung.....	73
Tabelle 3-15:	Bewertungsskala für den kumulierten Energieaufwand. Die Werte für den kumulierten Energieaufwand entsprechen jeweils der unteren Grenze der jeweiligen Bewertung.....	73
Tabelle 3-16:	Kriterien, die als Berechnungsgrundlage für die Akzeptanzkriterien dienen .....	75
Tabelle 3-17:	Beschreibung der Eignung und des technischen Stands der Alternativen zu synthetischen Kraftstoffen.....	77
Tabelle 3-18:	Vergleichspfade für Kostenverhältnisbestimmung .....	81
Tabelle 3-19:	Stufen des Kommerzialisierungsgrades .....	84
Tabelle 3-20:	Kommerzialisierungsgrad für Einzelprozesse .....	85

Tabelle 3-21:	Weltweite Bedarfe für ausgewählte Koppelprodukte.....	87
Tabelle 4-1:	Bewertung der generischen Referenzpfade für synthetische Kraftstoffe .....	90
Tabelle 4-2:	Basis für die TÖA der Herstellung der generischen Pfade .....	93
Tabelle 4-3:	Indikatorbewertung der generischen Pfade aus Sicht der Kraftstoffherstellung .....	98
Tabelle 4-4:	Zusammenfassung Bewertung der Herstellung für Ammoniak .....	99
Tabelle 4-5:	Bewertung der Referenzpfade für die Kraftstoffnutzung im Bereich Straße (Pkw) .....	103
Tabelle 4-6:	Bewertung der Referenzpfade für die Kraftstoffnutzung im Bereich Straße (leichte und schwere Nutzfahrzeuge).....	107
Tabelle 4-7:	Bewertung der Referenzpfade für die Kraftstoffnutzung im Bereich Schifffahrt.....	109
Tabelle 4-8:	Bewertung der Referenzpfade für die Kraftstoffnutzung im Bereich Luftfahrt.....	113
Tabelle 4-9:	Bewertung der Referenzpfade für die Anwendung im Bereich Rückverstromung .....	115
Tabelle 4-10:	Bewertungsübersicht generische Pfade, Integration ins Verkehrssystem: Bereich Pkw (Kosten exkl. MWSt und EnergieSt).....	117
Tabelle 4-11:	Bewertungsübersicht generische Pfade, Integration ins Verkehrssystem: Bereich SNF (Kosten exkl. MWSt und EnergieSt) .....	120
Tabelle 4-12:	Abschätzung zu Anschaffungs- und Kraftstoffkosten in der Schifffahrt; die absoluten Kraftstoffkosten beziehen sich auf die Gesamtkraftstoffkosten während der Lebensdauer von 25 Jahren angenommen zurückgelegten Distanz des Referenzschiffes von 1,93 Mio. km.....	122
Tabelle 4-13:	Bewertung der Referenzpfade für die Schifffahrt hinsichtlich der Integration ins Verkehrssystem .....	123
Tabelle 4-14:	Abschätzung zu Anschaffungs- und Treibstoffkosten in der Luftfahrt für einen Airbus A330-200; die absoluten Treibstoffkosten beziehen sich auf die Gesamttreibstoffkosten während der Lebensdauer von 30 Jahren angenommen zurückgelegten Distanz des Referenzflugzeuges von 111 Mio. km.....	124
Tabelle 4-15:	Bewertung der Referenzpfade für die Luftfahrt hinsichtlich der Integration ins Verkehrssystem .....	125

Tabelle 4-16:	Vergleich der Gesteungskosten für synthetisches Methan, Biogas und fossiles Erdgas basierend auf den Analysen der Kraftstoffherstellung.....	126
Tabelle 4-17:	Bewertung der Referenzpfade für die Rückverstromung hinsichtlich der Integration ins Verkehrssystem .....	127
Tabelle 4-18:	Zusammenhang zwischen Emissionen der Herstellung des Kraftstoffes (Elektrolyse, Synthese und CO <sub>2</sub> -Abscheidung) und Verbrauch.....	130
Tabelle 4-19:	Ökologische Bewertung der generischen Kraftstoffe im Bereich Pkw .....	131
Tabelle 4-20:	Ökologische Bewertung der generischen Kraftstoffe im Bereich leichte Nutzfahrzeuge .....	133
Tabelle 4-21:	Ökologische Bewertung der generischen Kraftstoffe im Bereich schwere Nutzfahrzeuge .....	135
Tabelle 4-22:	Ökologische Bewertung der generischen Kraftstoffe im Bereich Schifffahrt.....	137
Tabelle 4-23:	Ökologische Bewertung der generischen Kraftstoffe im Bereich Luftfahrt .....	139
Tabelle 4-24:	Ökologische Bewertung der generischen Kraftstoffe im Bereich Rückverstromung .....	140
Tabelle 4-25:	Übersicht über Variationen der einzelnen Elemente der Pfade.....	141
Tabelle 4-26:	Bewertungsübersicht Akzeptanz: Bereich Pkw .....	145
Tabelle 4-27:	Bewertungsübersicht Akzeptanz: Bereiche LNF und SNF .....	146
Tabelle 4-28:	Bewertungsübersicht Akzeptanz: Bereich Schifffahrt.....	147
Tabelle 4-29:	Bewertungsübersicht Akzeptanz: Bereich Luftfahrt.....	148
Tabelle 4-30:	Bewertungsübersicht Akzeptanz: Bereich Rückverstromung.....	148
Tabelle 4-31:	Bewertungsübersicht Markteinführung: Bereich Pkw .....	150
Tabelle 4-32:	Bewertungsübersicht Markteinführung: Bereich leichte Nutzfahrzeuge .....	153
Tabelle 4-33:	Bewertungsübersicht Markteinführung: Bereich schwere Nutzfahrzeuge...	156
Tabelle 4-34:	Bewertungsübersicht Markteinführung: Bereich Schifffahrt.....	159
Tabelle 4-35:	Bewertungsübersicht Markteinführung: Bereich Luftfahrt.....	162



Tabelle 5-1:	Bewertung der spezifischen Kraftstoffpfade der EiV-Verbundvorhaben.....	166
Tabelle 5-2:	Verbünde ohne Zusammenarbeit mit TÖA .....	168
Tabelle 5-3:	Größenordnung heutiger Kraftstoffpreise.....	169
Tabelle 5-4:	Bewertung der verbundspezifischen Kraftstoffpfade.....	173
Tabelle 5-5:	Bewertung der Verbundpfade für die Kraftstoffnutzung im Bereich Straße (Pkw) .....	175
Tabelle 5-6:	Bewertung der Verbundpfade für die Kraftstoffnutzung im Bereich leichte Nutzfahrzeuge (LNF).....	177
Tabelle 5-7:	Bewertung der Verbundpfade für die Kraftstoffnutzung im Bereich schwere Nutzfahrzeuge (SNF) .....	180
Tabelle 5-8:	Bewertung der Verbundpfade für die Kraftstoffnutzung im Bereich Schifffahrt.....	182
Tabelle 5-9:	Bewertung der Verbundpfade für die Kraftstoffnutzung im Bereich Luftfahrt.....	185
Tabelle 5-10:	Bewertung der Verbundpfade für die Brennstoffnutzung in der Rückverstromung .....	187
Tabelle 5-11:	Bewertungsübersicht verbundspezifische Pfade hinsichtlich der Integration ins Verkehrssystem: Bereich Pkw (exkl. MWSt und EnergieSt).....	190
Tabelle 5-12:	Bewertungsübersicht verbundspezifische Pfade hinsichtlich der Integration ins Verkehrssystem: Bereich LNF (exkl. MWSt und EnergieSt).....	191
Tabelle 5-13:	Bewertungsübersicht verbundspezifischer Pfade hinsichtlich der Integration ins Verkehrssystem: Bereich SNF (exkl. MWSt und EnergieSt).....	192
Tabelle 5-14:	Bewertung der Referenzpfade für die Schifffahrt hinsichtlich der Integration ins Verkehrssystem .....	194
Tabelle 5-15:	Bewertung der Referenzpfade für die Luftfahrt hinsichtlich der Integration ins Verkehrssystem .....	195
Tabelle 5-16:	Bewertung der Referenzpfade für die Rückverstromung hinsichtlich der Integration ins Verkehrssystem .....	196
Tabelle 5-17:	Datengrundlage für die ökologische Bewertung der Verbundpfade .....	197

Tabelle 5-18:	Ökologische Bewertung der Verbundpfade im Bereich Pkw .....	198
Tabelle 5-19:	Ökologische Bewertung der Verbundpfade im Bereich leichte Nutzfahrzeuge .....	199
Tabelle 5-20:	Ökologische Bewertung der Verbundpfade im Bereich schwere Nutzfahrzeuge .....	200
Tabelle 5-21:	Ökologische Bewertung der Verbundpfade für die Schifffahrt .....	201
Tabelle 5-22:	Ökologische Bewertung der Verbundpfade für die Luftfahrt .....	202
Tabelle 5-23:	Ökologische Bewertung der Verbundpfade für die Rückverstromung .....	203
Tabelle 5-24:	Bewertungsübersicht Akzeptanz: Bereich Pkw .....	207
Tabelle 5-25:	Bewertungsübersicht Akzeptanz: Bereiche LNF und SNF .....	208
Tabelle 5-26:	Bewertungsübersicht Akzeptanz: Bereich Schifffahrt .....	209
Tabelle 5-27:	Bewertungsübersicht Akzeptanz: Bereich Luftfahrt .....	209
Tabelle 5-28:	Bewertungsübersicht Akzeptanz: Bereich Rückverstromung .....	210
Tabelle 5-29:	Bewertungsübersicht Markteinführung: Bereich Pkw .....	211
Tabelle 5-30:	Bewertungsübersicht Markteinführung: Bereich leichte Nutzfahrzeuge .....	215
Tabelle 5-31:	Bewertungsübersicht Markteinführung: Bereich schwere Nutzfahrzeuge .....	218
Tabelle 5-32:	Bewertungsübersicht Markteinführung: Bereich Schifffahrt .....	222
Tabelle 5-33:	Bewertungsübersicht Markteinführung: Bereich Luftfahrt .....	225
Tabelle 6-1:	Annahmen CO <sub>2</sub> -Emissionsnormen für Pkw, LNF und SNF .....	233
Tabelle 6-2:	Zentrale Annahmen der BEniVer-Szenarien für den Straßenverkehr .....	234
Tabelle 6-3:	Annahmen der BEniVer-Szenarien in Bezug auf die Fahrleistung .....	235
Tabelle 6-4:	Annahmen für Energiepreise (in €2020, soweit nicht anders angegeben) .....	236
Tabelle 6-5:	Referenzen und Annahmen zur überschlägigen Berechnung des Kraftstoffbedarfes von Landwirtschaft und Sonderfahrzeugen für Nischenanwendungen .....	246

Tabelle 6-6:	Biomasse-Reststoffpotenziale und Preise .....	276
Tabelle 7-1:	Übersicht Patentanalyse für synthetische Kraftstoffe und Trendentwicklung .....	297
Tabelle 7-2:	Übersicht der Publikationsanalyse für synthetische Kraftstoffe und Trendentwicklung .....	318
Tabelle 7-3:	Technische Ergebnisse der H <sub>2</sub> Bereitstellung der Standortanalysen .....	326
Tabelle 7-4:	Stromgestehungskosten aus den Standortanalysen.....	329
Tabelle 8-1:	Zeitungstitel, Verlag, Auflagenstärke und Anzahl der in die Auswertung eingeflossener Artikel der sechs überregionalen, deutschen Tageszeitungen.....	334
Tabelle 9-1:	Funktionen eines TIS (in Anlehnung an [Hekkert et al. 2011, S. 10]) .....	363
Tabelle 9-2:	Importabhängigkeit der EU und Deutschlands für ausgewählte Energieträger (Stand 2020) .....	371
Tabelle 9-3:	Bruttoinlandsverbrauch an Energieträgern in der EU 27 (Stand 2019) .....	371
Tabelle 9-4:	Primärenergieverbrauch Deutschland nach Energieträgern (Stand 2019).....	372
Tabelle 9-5:	Endenergieverbrauch von Öl und Ölprodukten und Gas nach Sektoren (Stand 2019 - in TWh) .....	373
Tabelle 9-6:	Anteile von Öl und Ölprodukten und Gas nach Sektoren am Endenergieverbrauch (Stand 2019 – in %).....	373
Tabelle 9-7:	Liste der analysierten Länder, nach Kontinenten sortiert .....	386
Tabelle 9-8:	Schematische Ländergruppenmatrix .....	390
Tabelle 9-9:	Empfehlungen für den strategischen Einsatz von MEM zum Aufbau eines globalen Wasserstoffmarktes.....	394
Tabelle 10-1:	Ausgenutzte EE-Potenziale in 2050 .....	418
Tabelle 10-2:	Eigenschaften der Elektrolysetechnologien .....	422
Tabelle 10-3:	Auflistung des F&E-Bedarfs der Herstellungstechnologien .....	426
Tabelle 10-4:	Übersicht zur Bewertung der Treibstoffoptionen in der Luftfahrt .....	438

---

Tabelle 10-5: Zertifizierte Treibstoffe nach ASTM D7566 (Reihenfolge entspricht der Auflistung im Anhang der ASTM D7566); *Erweiterung laut ASTM D7566 möglich .....	439
Tabelle 10-6: Übersicht zur Bewertung der Kraftstoffoptionen in der Schifffahrt.....	451
Tabelle 10-7: Übersicht der Bewertung der strombasierten Kraftstoffpfade für den Schwerlastverkehr (40 t zulässige Gesamtmasse) .....	469
Tabelle 10-8: Übersicht der Bewertung der generischen, strombasierten Kraftstoffpfade für den Pkw-Verkehr.....	471

## 11.4 Literaturverzeichnis

Abdalla, Ayoub; Liu, Dong (2018): Dimethyl Carbonate as a Promising Oxygenated Fuel for Combustion: A Review. In: *Energies* 11 (6), S. 1552. DOI: 10.3390/en11061552

Abdin, Zainul; Tang, Chunguang; Liu, Yun; Catchpole, Kylie (2021): Large-scale stationary hydrogen storage via liquid organic hydrogen carriers. In: *iScience* 24 (9), S. 102966. DOI: 10.1016/j.isci.2021.102966

ACEA (2020): All new trucks sold must be fossil free by 2040, agree truck makers and climate researchers. Hg. v. Association des Constructeurs Européens d'Automobiles (ACEA). Online verfügbar unter <https://www.acea.auto/press-release/all-new-trucks-sold-must-be-fossil-free-by-2040-agree-truck-makers-and-climate-researchers/>

ADAC (2022): ADAC Autodatenbank App. ADAC. Online verfügbar unter <https://www.adac.de/services/apps/autodatenbank/>, zuletzt geprüft am 10.12.2022

Adelung, Sandra; Maier, Simon; Dietrich, Ralph-Uwe (2021): Impact of the reverse water-gas shift operating conditions on the Power-to-Liquid process efficiency. In: *Sustainable Energy Technologies and Assessments* (43), S. 100897. DOI: 10.1016/j.seta.2020.100897

AGEB (2020): Energieverbrauch in Deutschland im Jahr 2019. Hg. v. AG Energiebilanzen e.V. (AGEB). Online verfügbar unter [https://ag-energiebilanzen.de/wp-content/uploads/2021/02/ageb\\_jahresbericht2019\\_20200325\\_dt.pdf](https://ag-energiebilanzen.de/wp-content/uploads/2021/02/ageb_jahresbericht2019_20200325_dt.pdf), zuletzt geprüft am 14.12.2022

Air Liquide (2023): Luftzerlegungsanlagen - Großanlagen für die Vor-Ort-Erzeugung. Air Liquide Deutschland GmbH. Online verfügbar unter <https://de.airliquide.com/unser-equipment/luftzerlegungsanlagen>, zuletzt geprüft am 30.03.2023

Air Products GmbH (Hg.): Wasserstoff und Kohlenmonoxid (Synthesegas). Online verfügbar unter <https://www.airproducts.de/company/innovation/hydrogen-and-carbon-monoxide>, zuletzt geprüft am 30.03.2023

Airbus (2021a): Aircraft Characteristics. Airport and Maintenance Planning. Airbus. Online verfügbar unter <https://www.airbus.com/en/airport-operations-and-technical-data/aircraft-characteristics>, zuletzt geprüft am 12.04.2023

Airbus (2021b): An A350 fuelled by 100% SAF just took off. Airbus. Online verfügbar unter <https://www.airbus.com/fr/node/4021>, zuletzt geprüft am 12.04.2023

Airbus (2022a): Electric flight. Laying the groundwork for zero-emission aviation. Airbus. Online verfügbar unter <https://www.airbus.com/en/innovation/zero-emission-journey/electric-flight>, zuletzt geprüft am 12.04.2023

Airbus (2022b): 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 12.04.2023

Airbus (2022c): The ZEROe demonstrator has arrived. Airbus. Online verfügbar unter <https://www.airbus.com/en/newsroom/stories/2022-02-the-zeroe-demonstrator-has-arrived>, zuletzt geprüft am 12.04.2023

Albrecht, Friedemann G.; König, Daniel H.; Baucks, Nadine; Dietrich, Ralph-Uwe (2017): A standardized methodology for the techno-economic evaluation of alternative fuels – A case study. In: *Fuel* (194), S. 511–526. DOI: 10.1016/j.fuel.2016.12.003

Ammar, Nader R. (2019): An environmental and economic analysis of methanol fuel for a cellular container ship. In: *Transportation Research Part D: Transport and Environment* (69), S. 66–76. DOI: 10.1016/j.trd.2019.02.001

Amt für Brand- und Katastrophenschutz (Hg.) (2018): Jahresbericht 2018 der Feuerwehr Augsburg. Unter Mitarbeit von Berufsfeuerwehr Augsburg. Online verfügbar unter [https://www.augsburg.de/fileadmin/user\\_upload/buergerservice\\_rathaus/Feuerwehr/Jahresbericht\\_2018\\_.pdf](https://www.augsburg.de/fileadmin/user_upload/buergerservice_rathaus/Feuerwehr/Jahresbericht_2018_.pdf), zuletzt geprüft am 26.07.2022

Ares(2022)3836651: Entwurf einer delegierten Verordnung zur Ergänzung der Richtlinie (EU) 2018/2001 des Europäischen Parlaments und des Rates durch die Festlegung einer Methodik der Union mit detaillierten Regeln für die Herstellung von erneuerbaren flüssigen und gasförmigen Verkehrskraftstoffen nicht biologischen Ursprungs. Online verfügbar unter [https://ec.europa.eu/info/law/better-regulation/have-your-say/initiatives/7046068-Produktion-erneuerbarer-Kraftstoffe-Anteil-des-Stroms-aus-erneuerbaren-Energietragern-Vorgaben\\_de](https://ec.europa.eu/info/law/better-regulation/have-your-say/initiatives/7046068-Produktion-erneuerbarer-Kraftstoffe-Anteil-des-Stroms-aus-erneuerbaren-Energietragern-Vorgaben_de)

Ares(2022)3836721: Entwurf einer delegierten Verordnung zur Ergänzung der Richtlinie (EU) 2018/2001 des Europäischen Parlaments und des Rates durch die Festlegung einer Mindestschwelle für die Einsparung von Treibhausgasemissionen durch recycelte Kohlenstoffbrennstoffe und durch die Festlegung einer Methodik zur Bewertung von Treibhausgasemissionseinsparungen durch erneuerbare flüssige und gasförmige Verkehrskraftstoffe nicht biologischen Ursprungs und aus recycelten Kohlenstoffbrennstoffen. Online verfügbar unter [https://ec.europa.eu/info/law/better-regulation/have-your-say/initiatives/12713-Renewable-energy-method-for-assessing-greenhouse-gas-emission-savings-for-certain-fuels\\_en](https://ec.europa.eu/info/law/better-regulation/have-your-say/initiatives/12713-Renewable-energy-method-for-assessing-greenhouse-gas-emission-savings-for-certain-fuels_en)

Argus (2018a): Argus Global Methanol Demand 2018. Argus Media Ltd. Online verfügbar unter <https://www.argusmedia.com/-/media/Files/brochures-and-downloads/global-methanol-demand-2018-flow-chart.ashx?la=en&hash=090F0C06A6A396546B3698F913E6A1AC54DEAE8E>, zuletzt geprüft am 30.03.2023

Argus (2018b): An overview of the global LPG market and its impact in Latin America. Argus Media Ltd. Online verfügbar unter <https://aiglp.org/aiglp2018/docs/overview-del-escenario-de-oferta-mundial-de-glp-y-sus-impactos-en-latino-america.pdf>, zuletzt geprüft am 30.03.2023

Arndt, Christoph; Neuling, Ulf; Vorsatz, Martin; Prause, Juliane; Molzberger, Uwe; Le Clercq, Patrick et al. (2021): Konzeptionelle und technische Ausgestaltung einer Entwicklungsplattform für Power-to-Liquid-Kraftstoffe. Abschlussbericht. Hg. v. Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V. (DLR), Technische Universität Hamburg (TUHH) und Griesemann Gruppe. Online verfügbar unter [https://www.now-gmbh.de/wp-content/uploads/2021/08/EPP\\_Abschlussbericht.pdf](https://www.now-gmbh.de/wp-content/uploads/2021/08/EPP_Abschlussbericht.pdf)

ASTM D7566: ASTM D7566-20c: Specification for Aviation Turbine Fuel Containing Synthesized Hydrocarbons

ASTM D7862: ASTM D7862-21: Specification for Butanol for Blending with Gasoline for Use as Automotive Spark-Ignition Engine Fuel

ATAG (2020): Aviation: Benefits Beyond Borders 2020. Air Transport Action Group (ATAG). Online verfügbar unter <https://aviationbenefits.org/downloads/aviation-benefits-beyond-borders-2020/>, zuletzt geprüft am 10.06.2022

Atchison, Julian (2022): Green ammonia in Morocco: an update. Ammonia Energy Association. Online verfügbar unter <https://www.ammoniaenergy.org/articles/green-ammonia-in-morocco-an-update/>, zuletzt geprüft am 16.02.2023

Audi MediaCenter (2022): Sustainable fuel, lower emissions: Audi approves many of its V6 diesel engines for use with renewable fuel. Audi MediaCenter. Online verfügbar unter <https://www.audi-mediacycenter.com/en/press-releases/sustainable-fuel-lower-emissions-audi-approves-many-of-its-v6-diesel-engines-for-use-with-renewable-fuel-14509>, zuletzt geprüft am 24.03.2022

Auer, M. (2022): Strombasierte Kraftstoffe für die Anwendung in der Rückverstromung, 19.10.2022. Persönliche Kommunikation (M. Auer als Vertretung für E2Fuels)

Avicenne Energy (2020): Worldwide Rechargeable Battery Market 2019-2030. 2020 edition. Avicenne Energy. Online verfügbar unter [http://www.avicenne.com/reports\\_energy.php#rapport2](http://www.avicenne.com/reports_energy.php#rapport2)

BAFA (2021): Informationsblatt CO<sub>2</sub>-Faktoren. Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle (BAFA). Online verfügbar unter [https://www.bafa.de/SharedDocs/Downloads/DE/Energie/eew\\_infoblatt\\_co2\\_faktoren\\_2021.html](https://www.bafa.de/SharedDocs/Downloads/DE/Energie/eew_infoblatt_co2_faktoren_2021.html), zuletzt geprüft am 25.07.2022

BAFA (2022): Rohöl - RohöllINFO Juli 2022. Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle (BAFA). Online verfügbar unter [https://www.bafa.de/SharedDocs/Kurzmeldungen/DE/Energie/Rohoel/2022\\_07\\_rohloelinfo.html](https://www.bafa.de/SharedDocs/Kurzmeldungen/DE/Energie/Rohoel/2022_07_rohloelinfo.html), zuletzt geprüft am 10.12.2022

Balkanski, Y.; Myhre, G.; Gauss, M.; Rädcl, G.; Highwood, E. J.; Shine, K. P. (2010): Direct radiative effect of aerosols emitted by transport: from road, shipping and aviation. In: *Atmos. Chem. Phys.* 10 (10), S. 4477–4489. DOI: 10.5194/acp-10-4477-2010

Bartholomew, Calvin H.; Farrauto, Robert J. (2010): Hydrogen Production and Synthesis Gas Reactions. In: Calvin H. Bartholomew und Robert J. Farrauto (Hg.): *Fundamentals of industrial catalytic processes*. 2. ed. Hoboken, NJ: Wiley-Interscience, 2. ed. Hoboken, NJ: Wiley-Interscience, S. 339–486

BASF: Methyl formate pure. BASF SE. Online verfügbar unter <https://products.basf.com/global/en/ci/methyl-formate-pure.html>, zuletzt geprüft am 30.03.2023

Basma, Hussein; Saboori, Arash; Rodriguez, Felipe (2021): Total cost of ownership for tractor-trailers in Europe: Battery electric versus diesel. Hg. v. International Council on Clean Transportation (ICCT). Online verfügbar unter <https://theicct.org/sites/default/files/publications/TCO->

BETs-Europe-white-paper-v4-nov21.pdf?utm\_source=ICCT+mailing+list&utm\_campaign=db9e330ed3-lately\_from\_feb2018\_COPY\_01&utm\_medium=email&utm\_term=0\_ef73e76009-db9e330ed3-510831935, zuletzt geprüft am 13.12.2022

BAST (2017): Fahrleistungserhebung 2014 – Inländerfahrleistung. BAST-Bericht V 290. Bundesanstalt für Straßenwesen (BAST). Online verfügbar unter <https://www.bast.de/DE/Publikationen/Berichte/unterreihe-v/2018-2017/v290.html>, zuletzt geprüft am 26.07.2022

BDEW (2022a): Interaktive Karte "Gas kann grün". Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e.V. (BDEW). Online verfügbar unter <https://www.bdew.de/energie/erdgas/interaktive-karte-gas-kann-gruen/>, zuletzt geprüft am 10.12.2022

BDEW (2022b): BDEW-Strompreisanalyse Dezember 2022. Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e.V. (BDEW). Online verfügbar unter <https://www.bdew.de/service/daten-und-grafiken/bdew-strompreisanalyse/>

BEHG (2022): Brennstoffemissionshandelsgesetz. BEHG. Bundesministerium der Justiz, vom "Vom 12.12.2019 (BGBl. I S. 2728), das zuletzt durch Artikel 2 des Gesetzes vom 09.11.2022 (BGBl. I S. 2006) geändert worden ist". Online verfügbar unter <https://www.gesetze-im-internet.de/behg/BEHG.pdf>, zuletzt geprüft am 11.12.2022

Bellouin, Nicolas; Rae, Jamie; Jones, Andy; Johnson, Colin; Haywood, Jim; Boucher, Olivier (2011): Aerosol forcing in the Climate Model Intercomparison Project (CMIP5) simulations by HadGEM2-ES and the role of ammonium nitrate. In: *J. Geophys. Res.* 116 (D20). DOI: 10.1029/2011JD016074

Bengtsson, S.; Andersson, K.; Fridell, E. (2011): A comparative life cycle assessment of marine fuels. In: *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part M: Journal of Engineering for the Maritime Environment* (225 [2]), S. 97–110. DOI: 10.1177/1475090211402136

Berber, Adnan (2019): The effect of Diesel-Methanol Blends with Volumetric Proportions on The Performance and Emissions of A Diesel Engine. In: *mech* (25 [5]), S. 363–369. DOI: 10.5755/j01.mech.25.5.22954

Bergek, Anna; Jacobsson, Staffan; Carlsson, Bo; Lindmark, Sven; Rickne, Annika (2008): Analyzing the functional dynamics of technological innovation systems: A scheme of analysis. In: *Research Policy* (37), S. 407–429

Berufsfeuerwehr München (Hg.) (2020): Jahresbericht 2020. Online verfügbar unter <https://stadt.muenchen.de/dam/jcr:96b48539-2f8d-4d22-a378-07aa0e42dd6e/Jahresbericht%202020-interaktiv.pdf>, zuletzt geprüft am 26.07.2022

BImSchG (2022): Bundes-Immissionsschutzgesetz. BImSchG. Bundesministerium der Justiz, vom "Vom 17.05.2013 (BGBl. I S. 1274; 2021I S. 123), das zuletzt durch Artikel 2 Absatz 3 des Gesetzes vom 19.10.2022 (BGBl. I S. 1792) geändert worden ist". Online verfügbar unter <https://www.gesetze-im-internet.de/bimschg/BImSchG.pdf>, zuletzt geprüft am 18.11.2021



Blochum, Sebastian; Fellner, Felix; Mühlthaler, Markus; Härtl, Martin; Wachtmeister, Georg; Yoneya, Naoki; Sauerland, Henning (2021): Comparison of Promising Sustainable C1-Fuels Methanol, Dimethyl Carbonate, and Methyl Formate in a DISI Single-Cylinder Light Vehicle Gasoline Engine. In: SAE Technical Paper Series. SAE Powertrains, Fuels & Lubricants Digital Summit, SEP. 28, 2021: SAE International 400 Commonwealth Drive, Warrendale, PA, United States (SAE Technical Paper Series)

BMDV (2021): Verkehr in Zahlen 2020/2021. Unter Mitarbeit von Kraftfahrt-Bundesamt, DLR und DIW. Hg. v. Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMDV) (49. Jahrgang). Online verfügbar unter <https://www.bmdv.bund.de/SharedDocs/DE/Publikationen/G/verkehr-in-zahlen-2020-pdf.pdf>, zuletzt geprüft am 10.12.2022

BMDV (2022): Verkehr in Zahlen 2021/2022. Unter Mitarbeit von Kraftfahrt-Bundesamt, DLR und DIW. Hg. v. Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMDV) (50. Jahrgang). Online verfügbar unter [https://bmdv.bund.de/SharedDocs/DE/Publikationen/G/verkehr-in-zahlen-2021-2022-pdf.pdf?\\_\\_blob=publicationFile](https://bmdv.bund.de/SharedDocs/DE/Publikationen/G/verkehr-in-zahlen-2021-2022-pdf.pdf?__blob=publicationFile)

BMUV (2022): Deutsche Nachhaltigkeitsstrategie. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz (BMUV). Online verfügbar unter <https://www.bmu.de/themen/nachhaltigkeit-digitalisierung/nachhaltigkeit/strategie-und-umsetzung/deutsche-nachhaltigkeitsstrategie>, zuletzt geprüft am 11.12.2022

BMWK (2021): Bundeswirtschaftsministerium fördert Neubau von Betankungsschiffen für LNG und erneuerbare Kraftstoffe. Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK). Online verfügbar unter <https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Pressemitteilunggen/2021/10/20211027--bmwi-foerdert-neubau-von-betankungsschiffen-fuer-Ing-und-erneuerbare-kraftstoffe.html>, zuletzt geprüft am 22.01.2023

BMWK (2022a): Energiedaten: Gesamtausgabe. Hg. v. Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK). Online verfügbar unter <https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Artikel/Energie/energiedaten-gesamtausgabe.html>, zuletzt geprüft am 14.12.2022

BMWK (2022b): Eröffnungsbilanz Klimaschutz. Hg. v. Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK). Online verfügbar unter [https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Downloads/Energie/220111\\_eroeffnungsbilanz\\_klimaschutz.pdf](https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Downloads/Energie/220111_eroeffnungsbilanz_klimaschutz.pdf)

BNEF (2020): New Energy Outlook 2020. BloombergNEF (BNEF). Online verfügbar unter <https://about.bnef.com/new-energy-outlook-2020/>

BNetzA (2023): Bundesnetzagentur veröffentlicht Daten zum Strommarkt 2022. Bundesnetzagentur (BNetzA). Online verfügbar unter [https://www.bundesnetzagentur.de/SharedDocs/Pressemitteilungen/DE/2023/20230104\\_smard.html](https://www.bundesnetzagentur.de/SharedDocs/Pressemitteilungen/DE/2023/20230104_smard.html), zuletzt geprüft am 26.04.2023

Bothe, David; Zähringer, Michael; Bauer, Julian; Sieberg, Christoph; Korbmacher, Florian (2020): Crediting System for renewable fuels in EU Emission Standards for Road Transport. Report for the German Federal Ministry for Economic Affairs and Energy (BMWi). Hg. v. Frontier Economics und Flick Gocke Schaumburg. Online verfügbar unter <https://www.upei.org/images/crediting-systems-for-renewable-fuels-in-eu-emission-standards-for-road-transport-en.pdf>

bp (2022): Statistical Review of World Energy. 71st edition. Hg. v. Bp global. Online verfügbar unter <https://www.bp.com/en/global/corporate/energy-economics/statistical-review-of-world-energy.html>, zuletzt geprüft am 13.12.2022

Bracker, Joß (2017): An outline of sustainability criteria for synthetic fuels used in transport. Policy paper for Transport & Environment. Unter Mitarbeit von Christof Timpe. Hg. v. Öko-Institut e.V. Online verfügbar unter <https://www.oeko.de/fileadmin/oekodoc/Sustainability-criteria-for-synthetic-fuels.pdf>, zuletzt geprüft am 11.12.2022

Brown, Trevor (2020): Saudi Arabia to export renewable energy using green ammonia. Ammonia Energy Association. Online verfügbar unter <https://www.ammoniaenergy.org/articles/saudi-arabia-to-export-renewable-energy-using-green-ammonia/>, zuletzt geprüft am 16.02.2023

Bruns, Frank; Haan, Peter de; Bianchetti, Roberto; Follmer, Robert; Eggs, Johannes (2018): Bestandsaufnahme zu den Auswirkungen von Fernbusreisen auf Verkehrsentwicklung und Emissionen in Deutschland. Teilbericht des Projekts „Ökonomischer Vergleich der Verkehrsträger“. Hg. v. Umweltbundesamt (UBA) (33/2018). Online verfügbar unter <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/bestandsaufnahme-zu-den-auswirkungen-von>, zuletzt geprüft am 26.07.2022

Brussels (2023): Brussels Airlines and Brussels Airport kick off the new year with first delivery of Sustainable Aviation Fuel via NATO pipe-line. Brussels Airlines. Online verfügbar unter <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 geprüft am 15.03.2023

BT 19/16169 (19.12.2019): Drucksache 19/16169 - Antwort der Bundesregierung auf die Kleine Anfrage der Abgeordneten Kathrin Vogler, Andrej Hunko, Heike Hänsel, weiterer Abgeordneter und der Fraktion DIE LINKE. – Drucksache 19/14589 –. Online verfügbar unter <https://dserver.bundestag.de/btd/19/161/1916169.pdf>, zuletzt geprüft am 20.04.2023

BT 20/5830 (01.03.2023): Drucksache 20/5830 - Beschlussempfehlung und Bericht des Ausschusses für Wohnen, Stadtentwicklung, Bauwesen und Kommunen (24. Ausschuss) zu dem Gesetzentwurf der Bundesregierung – Drucksache 20/4823 –. Online verfügbar unter <https://dserver.bundestag.de/btd/20/058/2005830.pdf>, zuletzt geprüft am 16.05.2023

Bullerdiek, N.; Buse, J.; Dögnitz, N.; Feige, A.; Halling, A.-M.; Hauschild, S. et al. (2019): Einsatz von Multiblend-JET-A-1 in der Praxis. Zusammenfassung der Ergebnisse aus dem Modellvorhaben der Mobilitäts- und Kraftstoffstrategie. Hg. v. DBFZ Deutsches Biomasseforschungszentrum gemeinnützige GmbH. Leipzig. Online verfügbar unter <https://elib.dlr.de/130946/>, zuletzt geprüft am 06.04.2023

Bullerdiek, Nils; Quante, Gunnar (2022): A Book and Claim Approach for SAF - aireg's perspective on basic design principles. Hg. v. aireg e.V. Online verfügbar unter [https://aireg.de/wp-content/uploads/2022/08/bc-papier\\_v01-5.pdf](https://aireg.de/wp-content/uploads/2022/08/bc-papier_v01-5.pdf), zuletzt geprüft am 15.03.2023

Bullerdiek, Nils; Quante, Gunnar; Bube, Stefan; Neuling, Ulf; Martin, Kaltschmitt (2022): Non Drop-In Kraftstoffe im Luftverkehr. Ein gesamtsystemischer Vergleich von Nutzungs- und Einsatzmöglichkeiten. Unter Mitarbeit von Technische Universität Hamburg (TUHH) und Institut für Umwelttechnik und Energiewirtschaft (IUE). Hg. v. aireg e.V. Online verfügbar unter <https://aireg.de/wp-content/uploads/2022/01/aireg-studie-non-drop-in-kraftstoffe-im-luftverkehr-2022-01-19.pdf>, zuletzt geprüft am 10.12.2022

Bundeskartellamt (2022): Markttransparenzstelle für Kraftstoffe (MTS-K). Jahresbericht 2021. Hg. v. Bundeskartellamt. Online verfügbar unter [https://www.bundeskartellamt.de/DE/Wirtschaftsbereiche/Mineral%C3%B6l/MTS-Kraftstoffe/mtskraftstoffe\\_node.html](https://www.bundeskartellamt.de/DE/Wirtschaftsbereiche/Mineral%C3%B6l/MTS-Kraftstoffe/mtskraftstoffe_node.html), zuletzt geprüft am 14.12.2022

Bundesregierung (2020): Die Nationale Wasserstoffstrategie. Hg. v. Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi). Online verfügbar unter [https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Publikationen/Energie/die-nationale-wasserstoffstrategie.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=20](https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Publikationen/Energie/die-nationale-wasserstoffstrategie.pdf?__blob=publicationFile&v=20), zuletzt geprüft am 12.12.2022

Bundesregierung (2021a): Die deutsche Nachhaltigkeitsstrategie. Weiterentwicklung 2021 – Kurzfassung. Hg. v. Die Bundesregierung. Online verfügbar unter <https://www.bundesregierung.de/resource/blob/974430/1919202/b84e1a8f091845c8880ffb397d1fe6cb/2021-05-28-kurzfassung-nachhaltigkeit-data.pdf?download=1>, zuletzt geprüft am 11.12.2022

Bundesregierung (2021b): PtL-Roadmap. Nachhaltige strombasierte Kraftstoffe für den Luftverkehr in Deutschland. Hg. v. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMU), Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI), Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi), Bundesministerium für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung (BMZ) und Bundesverband der Deutschen Luftverkehrswirtschaft e. V. (BDL). Online verfügbar unter [https://bmdv.bund.de/SharedDocs/DE/Anlage/LF/ptl-roadmap.pdf?\\_\\_blob=publicationFile](https://bmdv.bund.de/SharedDocs/DE/Anlage/LF/ptl-roadmap.pdf?__blob=publicationFile), zuletzt geprüft am 16.06.2023

Bundesregierung (2022a): Bundesregierung gibt Teil der Ölreserve frei. Die Bundesregierung. Online verfügbar unter <https://www.bundesregierung.de/breg-de/aktuelles/erdoelreserve-2009506>, zuletzt geprüft am 26.04.2023

Bundesregierung (2022b): EU-Umweltrat: Nur noch CO2-frei fahren. Die Bundesregierung. Online verfügbar unter <https://www.bundesregierung.de/breg-de/themen/europa/verbrennermotoren-2058450>, zuletzt geprüft am 26.04.2023

Bundesregierung (2022c): Klimaneutrale Luftfahrt. Gemeinsames Papier der Bundesregierung. Hg. v. Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMDV). Online verfügbar unter [https://bmdv.bund.de/SharedDocs/DE/Anlage/K/presse/037-klimaneutrale-luftfahrt.pdf?\\_\\_blob=publicationFile](https://bmdv.bund.de/SharedDocs/DE/Anlage/K/presse/037-klimaneutrale-luftfahrt.pdf?__blob=publicationFile), zuletzt geprüft am 22.01.2023

Bünger, Björn; Matthey, Astrid (2020): Methodenkonvention 3.1 zur Ermittlung von Umweltkosten - Kostensätze. Hg. v. Umweltbundesamt (UBA). Dessau-Roßlau. Online verfügbar unter [https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2020-12-21\\_methodenkonvention\\_3\\_1\\_kostensaetze.pdf](https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2020-12-21_methodenkonvention_3_1_kostensaetze.pdf), zuletzt geprüft am 22.01.2023

Burchardt, J.; Franke, K.; Herhold, P.; Hohaus, M.; Humpert, H.; Päiväranta, J. et al. (2021): Klimapfade 2.0. Ein Wirtschaftsprogramm für die Zukunft. Hg. v. Boston Consulting Group im

Auftrag des BDI. Online verfügbar unter <https://web-assets.bcg.com/58/57/2042392542079ff8c9ee2cb74278/klimapfade-study-german.pdf>

Burger, Andreas; Bretschneider, Wolfgang (2021): Umweltschädliche Subventionen in Deutschland. Aktualisierte Ausgabe 2021. Hg. v. Umweltbundesamt (UBA). Online verfügbar unter <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/umweltschaedliche-subventionen-in-deutschland-0>, zuletzt geprüft am 11.12.2022

Burkhardt, Ulrike; Bock, Lisa; Bier, Andreas (2018): Mitigating the contrail cirrus climate impact by reducing aircraft soot number emissions. In: *npj Clim Atmos Sci* 1 (1). DOI: 10.1038/s41612-018-0046-4

Burre, Jannik; Bongartz, Dominik; Mitsos, Alexander (2019): Production of Oxymethylene Dimethyl Ethers from Hydrogen and Carbon Dioxide—Part II: Modeling and Analysis for OME 3–5. In: *Ind. Eng. Chem. Res.* 58 (14), S. 5567–5578. DOI: 10.1021/acs.iecr.8b05577

Burzlauff, Marcus (2017): Aircraft Fuel Consumption – Estimation and Visualization. Unter Mitarbeit von Technische Informationsbibliothek (TIB) und Dieter Scholz. Hg. v. Aircraft Design and Systems Group (AERO), Department of Automotive and Aeronautical Engineering, Hamburg University of Applied Sciences. Hamburg

CAAFI (2022): Fuel Qualification. Commercial Aviation Alternative Fuels Initiative (CAAFI). Online verfügbar unter [https://www.caafi.org/focus\\_areas/fuel\\_qualification.html#approved](https://www.caafi.org/focus_areas/fuel_qualification.html#approved), zuletzt geprüft am 10.12.2022

CAC: Synthetischer Flugkraftstoff aus Strom, Wasser und CO<sub>2</sub>. Die Neue CAC-Technologie: CO<sub>2</sub>-neutral und sauber. Hg. v. Chemieanlagenbau Chemnitz GmbH (CAC). Online verfügbar unter <https://www.cac-synfuel.com/de/kerosin>, zuletzt geprüft am 30.03.2023

Capaz, Rafael S.; Guida, Elisa; Seabra, Joaquim E. A.; Osseweijer, Patricia; Posada, John A. (2021): Mitigating carbon emissions through sustainable aviation fuels: costs and potential. In: *Biofuels, Bioprod. Bioref.* 15 (2), S. 502–524. DOI: 10.1002/bbb.2168

Carroll, Sean Goulding (2023): EU: Bahnbrechende Einigung für weniger CO<sub>2</sub> im Schiffsverkehr. EURACTIV Media Network BV. Online verfügbar unter <https://www.euractiv.de/section/verkehr/news/eu-bahnbrechende-einigung-fuer-weniger-co2-im-schiffsverkehr/>, zuletzt geprüft am 25.04.2023

CeRas: Central Reference Aircraft data System | Direct Operation Costs (DOC). RWTH Aachen. Online verfügbar unter <https://ceras.ilr.rwth-aachen.de/tiki/tiki-index.php?page=Direct+Operation+Costs+%28DOC%29&structure=CeRAS#Navigation>, zuletzt geprüft am 10.12.2022

Chatzinikolaou, Stefanos D.; Ventikos, Nikolaos P. (2016): Critical Analysis of Air Emissions from Ships: Lifecycle Thinking and Results. In: Harilaos N. Psaraftis (Hg.): Green transportation logistics. The quest for win-win solutions, Bd. 226. Cham, Heidelberg, New York, Dordrecht, London: Springer (International Series in Operations Research & Management Science, 226), S. 387–412

Chaudier, Julie (2021): Will Hydrogen fuel Morocco's industrial projects of the future? In: *The Africa Report*, 2021. Online verfügbar unter <https://www.theafricareport.com/124184/will-hydrogen-fuel-moroccos-industrial-projects-of-the-future/>, zuletzt geprüft am 16.02.2023

Clifford, Catherine (2022): The clean hydrogen energy economy was a dream. The climate bill could make it a reality this decade. In: *CNBC*, 2022. Online verfügbar unter <https://www.cnn.com/2022/09/08/clean-hydrogen-industry-got-huge-boost-from-inflation-reduction-act.html>, zuletzt geprüft am 11.12.2022

Climeworks (2017): Climeworks makes history with world's first commercial direct air capture plant. Hg. v. Climeworks AG. Online verfügbar unter <https://climeworks.com/news/today-climeworks-is-unveiling-its-proudest-achievement>, zuletzt geprüft am 30.03.2023

Collins, Leigh (2022): Shipping giant Maersk to become major green hydrogen consumer as it embraces methanol fuel. Hg. v. Recharge. Online verfügbar unter <https://www.recharge.news.com/energy-transition/shipping-giant-maersk-to-become-major-green-hydrogen-consumer-as-it-embraces-methanol-fuel/2-1-1143147>, zuletzt geprüft am 10.12.2022

DEA (2018): Technology Data for Renewable Fuels. Unter Mitarbeit von Energinet. Danish Energy Agency (DEA). Online verfügbar unter <https://ens.dk/en/our-services/projections-and-models/technology-data/technology-data-renewable-fuels>, zuletzt geprüft am 10.12.2022

DECHEMA (2023): NormAKraft: Fact Sheets zur Normkonformität und Materialverträglichkeit alternativer Kraftstoffe. \*\* in Vorbereitung \*\*. Hg. v. DECHEMA, Gesellschaft für Chemische Technik und Biotechnologie e.V. Frankfurt am Main

Department of Science and Innovation (2021): Hydrogen Society. Roadmap for South Africa 2021. Hg. v. Department of Science and Innovation. Republic of South Africa. Online verfügbar unter [https://www.dst.gov.za/images/South\\_African\\_Hydrogen\\_Society\\_RoadmapV1.pdf](https://www.dst.gov.za/images/South_African_Hydrogen_Society_RoadmapV1.pdf), zuletzt geprüft am 16.02.2023

Department Science and Innovation (2021): South Africa Hydrogen Valley. Final Report. Unter Mitarbeit von AngloAmerican, Bambili Energy, sanedi und engie. Hg. v. Department Science and Innovation. Republic of South Africa. Online verfügbar unter [https://www.dst.gov.za/images/2021/Hydrogen\\_Valley\\_Feasibility\\_Study\\_Report\\_Final\\_Version.pdf](https://www.dst.gov.za/images/2021/Hydrogen_Valley_Feasibility_Study_Report_Final_Version.pdf), zuletzt geprüft am 11.12.2022

Destatis (2019): Umweltökonomische Gesamtrechnungen: Transportleistungen und Energieverbrauch im Straßenverkehr 2007-2017. Hg. v. Statistisches Bundesamt (Destatis). Online verfügbar unter [https://www.destatis.de/DE/Themen/Gesellschaft-Umwelt/Umwelt/UGR/verkehr/Publicationen/Downloads/ugr-transportleistungen-energieverbrauch-5850010179004.pdf;jsessionid=E168A343E35DADE406A6FEA52756D188.live722?\\_\\_blob=publicationFile](https://www.destatis.de/DE/Themen/Gesellschaft-Umwelt/Umwelt/UGR/verkehr/Publicationen/Downloads/ugr-transportleistungen-energieverbrauch-5850010179004.pdf;jsessionid=E168A343E35DADE406A6FEA52756D188.live722?__blob=publicationFile), zuletzt geprüft am 05.08.2021

Dieterich, Vincent; Buttler, Alexander; Hanel, Andreas; Spliethoff, Hartmut; Fendt, Sebastian (2020): Power-to-liquid via synthesis of methanol, DME or Fischer–Tropsch-fuels: a review. In: *Energy Environ. Sci.* 13 (10), S. 3207–3252. DOI: 10.1039/D0EE01187H

DIN EN 14214: DIN EN 14214:2019-05, Flüssige Mineralölerzeugnisse - Fettsäure-Methylester (FAME) zur Verwendung in Dieselmotoren und als Heizöl - Anforderungen und Prüfverfahren; Deutsche Fassung EN 14214:2012+A2:2019

DIN EN 15940: DIN EN 15940:2019-10, Kraftstoffe - Paraffinischer Dieselmotorkraftstoff aus Synthese oder Hydrierungsverfahren - Anforderungen und Prüfverfahren; Deutsche Fassung EN 15940:2016+A1:2018+AC:2019

DIN EN 16723-2: DIN EN 16723-2:2017-10: Erdgas und Biomethan zur Verwendung im Transportwesen und Biomethan zur Einspeisung ins Erdgasnetz\_ - Teil\_2: Festlegungen für Kraftstoffe für Kraftfahrzeuge; Deutsche Fassung EN\_16723-2:2017

DIN EN 17124: DIN EN 17124:2022-12, Wasserstoff als Kraftstoff - Produktfestlegung und Qualitätssicherung für Wasserstoffbetankungsanlagen zur Abgabe gasförmigen Wasserstoffs - Protonenaustauschmembran (PEM)-Brennstoffzellenanwendungen für Fahrzeuge; Deutsche Fassung EN 17124:2022

DIN EN 228: DIN EN 228:2017-08, Kraftstoffe - Unverbleite Ottokraftstoffe - Anforderungen und Prüfverfahren; Deutsche Fassung EN 228:2012+A1:2017

DIN EN 589: DIN EN 589:2022-04, Kraftstoffe - Flüssiggas - Anforderungen und Prüfverfahren; Deutsche Fassung EN 589:2018+A1:2022

DIN EN 590: DIN EN 590:2022-05, Kraftstoffe - Dieselmotorkraftstoff - Anforderungen und Prüfverfahren; Deutsche Fassung EN 590:2022

DIN EN ISO 14040: DIN EN ISO 14040:2021-02: Umweltmanagement\_ - Ökobilanz\_ - Grundsätze und Rahmenbedingungen (ISO\_14040:2006\_+ Amd\_1:2020); Deutsche Fassung EN\_ISO\_14040:2006\_+ A1:2020

DIN EN ISO 14044: DIN EN ISO 14044:2018-05, Umweltmanagement - Ökobilanz - Anforderungen und Anleitungen (ISO 14044:2006 + Amd\_1:2017); Deutsche Fassung EN ISO 14044:2006 + A1:2018

DIN EN ISO 16903: DIN EN ISO 16903:2015-11, Erdöl- und Erdgasindustrie\_ - Eigenschaften von Flüssigerdgas mit Einfluss auf die Auslegung und die Materialauswahl (ISO\_16903:2015); Deutsche Fassung EN\_ISO\_16903:2015

DIN EN ISO 20519: DIN EN ISO 20519:2022-11, Schiffe und Meerestechnik\_ - Spezifikation für das Bunkern flüssigerdgasbetriebener Schiffe (ISO\_20519:2021); Deutsche Fassung EN\_ISO\_20519:2022

DIN/TS 51698: DIN/TS 51698:2022-12, Kraft- und Brennstoffe - Anforderungen - Dimethylether\_(DME)

DIN/TS 51699: DIN/TS 51699:2023-04, Kraft- und Brennstoffe - Polyoxymethylendimethylether (OME) - Anforderungen und Prüfverfahren

DLR (2018): Flughafen Stuttgart fördert DLR-Kooperationsprojekt HY4 mit 250.000 Euro. Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V. (DLR). Online verfügbar unter [https://www.dlr.de/content/de/artikel/news/2018/4/20181105\\_flughafen-stuttgart-foerdet-dlr-projekt.html](https://www.dlr.de/content/de/artikel/news/2018/4/20181105_flughafen-stuttgart-foerdet-dlr-projekt.html), zuletzt geprüft am 30.03.2023

DLR Verkehr (2022): Vector21: scenario and market analysis software for simulating future vehicle markets. Unter Mitarbeit von Institut für Fahrzeugkonzepte. Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V. Verkehr (DLR Verkehr). Online verfügbar unter <https://verkehrsfor-schung.dlr.de/de/projekte/vector21>, zuletzt geprüft am 10.12.2022

Dohrmann, Bernd (2009): Kundenbindung an der Zapfsäule. Gas Tanken - Eine eigene Gas-Tankstelle bringt neue Kunden ins Autohaus. In: *Auto+Umwelt* (17), S. 42. Online verfügbar unter <https://media1.autohaus.de/fm/5011/main.1954182.pdf>

Dorling, Nathan (2016): Approval for EN 15940 fuels for use in Mercedes-Benz Engines. LinkedIn. Online verfügbar unter <https://www.linkedin.com/pulse/approval-en-15940-fuels-use-mercedes-benz-engines-nathan-dorling>, zuletzt geprüft am 10.12.2022

DVGW: Power to Gas: Schlüsseltechnologie der Energiewende. DVGW Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches e.V. Online verfügbar unter <https://www.dvgw.de/themen/energie-wende/power-to-gas>, zuletzt geprüft am 30.03.2023

DWD: CDC (Climate Data Center). Deutscher Wetterdienst (DWD). Online verfügbar unter [https://www.dwd.de/DE/klimaumwelt/cdc/cdc\\_node.html](https://www.dwd.de/DE/klimaumwelt/cdc/cdc_node.html)

E4tech; Houlder (2021): Norway GreenVoyage2050 Project. IMO-Alternative fuels and energy carriers for shipping Workshop. Hg. v. International Maritime Organization (IMO) und Norwegian Ministry of Climate and Environment

EA Engineering, Science, and Technology (1999): Methanol Refueling Station Costs. Hg. v. EA Engineering, Science, and Technology, Inc. Online verfügbar unter <https://afdc.energy.gov/files/pdfs/methfr.pdf>, zuletzt geprüft am 10.12.2022

EC (2020): Mehr Ehrgeiz für das Klimaziel Europas bis 2030. In eine klimaneutrale Zukunft zum Wohl der Menschen investieren. Der Klimazielplan für 2030. Hg. v. European Commission (EC). Online verfügbar unter <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:52020DC0562&from=EN>, zuletzt geprüft am 11.12.2022

EC (2021a): Überarbeitung der Richtlinie über die Energiebesteuerung: Fragen und Antworten. European Commission (EC). Online verfügbar unter [https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/de/qanda\\_21\\_3662](https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/de/qanda_21_3662)

EC (2021b): Verkehr umweltverträglicher machen. Hg. v. European Commission (EC). Online verfügbar unter <https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/149507b6-00e3-11ec-8f47-01aa75ed71a1/language-de/format-PDF/source-233540079>

EC (2022a): Hydrogen. European Commission (EC). Online verfügbar unter [https://energy.ec.europa.eu/topics/energy-systems-integration/hydrogen\\_en](https://energy.ec.europa.eu/topics/energy-systems-integration/hydrogen_en), zuletzt geprüft am 11.12.2022

EC (2022b): Weekly Oil Bulletin. Oil Prices History. European Commission (EC). Online verfügbar unter [https://energy.ec.europa.eu/data-and-analysis/weekly-oil-bulletin\\_en](https://energy.ec.europa.eu/data-and-analysis/weekly-oil-bulletin_en), zuletzt geprüft am 14.12.2022

EC DGE (2009): The Potential of Market Pull Instruments for Promoting Innovation in Environmental Characteristics. Executive Summary. Hg. v. European Commission Directorate General Environment (EC DGE). Online verfügbar unter [https://ec.europa.eu/environment/enveco/rd\\_innovation/pdf/studies/market\\_pull\\_exec\\_summary.pdf](https://ec.europa.eu/environment/enveco/rd_innovation/pdf/studies/market_pull_exec_summary.pdf), zuletzt geprüft am 09.12.2022

EDi Hohenlohe: Freigaben für XtL-Kraftstoffe. EDi Energie-Direkt Hohenlohe GmbH. Online verfügbar unter <https://www.edi-hohenlohe.de/produkte/kraftstoffe/synthetischer-diesel/freigaben/>, zuletzt geprüft am 17.05.2023

EEX (2022): DataSource. European Energy Exchange AG (EEX). Online verfügbar unter <https://www.eex.com/en/market-data/eex-group-datasource>, zuletzt geprüft am 14.12.2022

EMSA (2021): Emission Report 2019. Hg. v. European Maritime Safety Agency (EMSA). Online verfügbar unter <https://mrv.emsa.europa.eu/#public/emission-report>, zuletzt geprüft am 12.04.2023

EnergieStG (2022): Energiesteuergesetz. EnergieStG. Bundesministerium der Justiz, vom "Vom 15.07.2006 (BGBl. I S. 1534; 2008 I S. 660, 1007), das zuletzt durch Artikel 1 des Gesetzes vom 19.12.2022 (BGBl. I S. 2483) geändert worden ist". Online verfügbar unter [https://www.gesetze-im-internet.de/energiestg/\\_\\_\\_2.html](https://www.gesetze-im-internet.de/energiestg/___2.html), zuletzt geprüft am 11.12.2022

Epiroc (2022): Epiroc wins large battery-electric equipment order for new all-electric mine in Canada. Epiroc AB. Online verfügbar unter <https://www.epirocgroup.com/en/media/corporate-press-releases/2022/20220704-epiroc-wins-large-battery-electric-equipment-order-for-new-all-electric-mine-in-canada>, zuletzt geprüft am 10.12.2022

ERK (2022): Zweijahresgutachten 2022. Gutachten zur Entwicklung der Treibhausgasemissionen, Trends der Jahresemissionsmengen und zur Wirksamkeit von Maßnahmen gemäß § 12 Abs. 4 Bundes Klimaschutzgesetz. Hg. v. Expertenrat für Klimafragen (ERK). Online verfügbar unter <https://www.expertenrat-klima.de>, zuletzt geprüft am 11.12.2022

Eschmann, Jonas (2020): Dekarbonisierte Containerschifffahrt - Spezifische Kosten und Preiseffekte am Beispiel Europas. Hg. v. Fraunhofer ISE. Universität Kassel. Online verfügbar unter <https://publica.fraunhofer.de/entities/publication/124199d2-fc4b-4b98-8e7b-ab838c93b080/details>, zuletzt geprüft am 10.12.2022

Eschmann, Jonas; O'Sullivan, Marlene; Baldauf, Thomas (Hg.) (2022): Scenarios for Future Trade Flows of Energy Technologies. 17th IAEE European Energy Conference. Athen, Griechenland, 21.-24. Sep. 2022. Online verfügbar unter <https://elib.dlr.de/187367/>, zuletzt geprüft am 10.12.2022

Esmaeili Aliabadi, Danial; Wulff, Niklas; Jordan, Matthias; Cyffka, Karl-Friedrich; Millinger, Markus (2022): Soft-coupling energy and power system models to analyze pathways toward a de-fossilized German transport sector. In: *Operations Research Proceedings (accepted)*



Esposito, Dan; Tallackson, Hadley (2022): The Inflation Reduction Act upends hydrogen economics with opportunities, pitfalls. Hg. v. UtilityDive. Online verfügbar unter <https://www.utilitydive.com/news/the-ira-will-accelerate-electrolyzed-hydrogens-future-heres-what-that-me/632925/>, zuletzt geprüft am 11.12.2022

EU 2018/2001 (2018): Richtlinie (EU) 2018/2001 des europäischen Parlaments und des Rates vom 11. Dezember 2018 zur Förderung der Nutzung von Energie aus erneuerbaren Quellen (Neufassung). Online verfügbar unter <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/LSU/?uri=CELEX:32018L2001>, zuletzt geprüft am 25.11.2022

EU 2019/1242 (2019): Verordnung (EU) 2019/1242 des europäischen Parlaments und des Rates vom 20. Juni 2019 zur Festlegung von CO<sub>2</sub>-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. Online verfügbar unter <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/?uri=CELEX:32019R1242>

EU 2019/631 (2019): Verordnung (EU) 2019/631 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 17. April 2019 zur Festsetzung von CO<sub>2</sub>-Emissionsnormen für neue Personenkraftwagen und für neue leichte Nutzfahrzeuge und zur Aufhebung der Verordnungen (EG) Nr. 443/2009 und (EU) Nr. 510/2011. Online verfügbar unter <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:32019R0631>, zuletzt geprüft am 10.12.2022

EU 2021/0197: Vorschlag für eine Verordnung des europäischen Parlaments und des Rates zur Änderung der Verordnung (EU) 2019/631 im Hinblick auf eine Verschärfung der CO<sub>2</sub>-Emissionsnormen für neue Personenkraftwagen und für neue leichte Nutzfahrzeuge im Einklang mit den ehrgeizigeren Klimazielen der Union. 2021/0197(COD). Online verfügbar unter <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/HTML/?uri=CELEX:52021PC0556>

EU 2021/0205-07/07/2022: Abstimmung zum Vorschlag für eine Verordnung des europäischen Parlaments und des Rates zur Gewährleistung gleicher Wettbewerbsbedingungen für einen nachhaltigen Luftverkehr. 2021/0205(COD) - 07/07/2022. Online verfügbar unter <https://oeil.secure.europarl.europa.eu/oeil/popups/summary.do?id=1710890&t=e&l=en>, zuletzt geprüft am 20.04.2023

EU 2021/0210: 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. 2021/0210(COD). Online verfügbar unter [https://eur-lex.europa.eu/resource.html?uri=cellar:078fb779-e577-11eb-a1a5-01aa75ed71a1.0018.02/DOC\\_1&format=PDF](https://eur-lex.europa.eu/resource.html?uri=cellar:078fb779-e577-11eb-a1a5-01aa75ed71a1.0018.02/DOC_1&format=PDF), zuletzt geprüft am 01.06.2022

EU 2021/0213: Vorschlag für eine Richtlinie des Rates zur Restrukturierung der Rahmenvorschriften der Union zur Besteuerung von Energieerzeugnissen und elektrischem Strom (Neufassung). 2021/0213(CNS). Online verfügbar unter <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/HTML/?uri=CELEX:52021PC0563>

EU 2021/0218: Vorschlag für eine Richtlinie des europäischen Parlaments und des Rates zur Änderung der Richtlinie (EU) 2018/2001 des Europäischen Parlaments und des Rates, der Verordnung (EU) 2018/1999 des Europäischen Parlaments und des Rates und der Richtlinie 98/70/EG des Europäischen Parlaments und des Rates im Hinblick auf die Förderung von Energie aus erneuerbaren Quellen und zur Aufhebung der Richtlinie (EU) 2015/652 des Rates.

2021/0218(COD). Online verfügbar unter <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/?uri=CELEX%3A52021PC0557>, zuletzt geprüft am 25.11.2022

EU 98/70/EG (1998): Richtlinie 98/70/EG des europäischen Parlaments und des Rates vom 13. Oktober 1998 über die Qualität von Otto- und Dieselmotorkraftstoffen und zur Änderung der Richtlinie 93/12/EWG des Rates. Online verfügbar unter <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/ALL/?uri=celex:31998L0070>, zuletzt geprüft am 25.11.2022

European Commission; Joint Research Centre; Prussi, M.; Yugo, M.; Prada, L. de; Padella, M. et al. (2020): JEC well-to-tank report V5 : JEC well-to-wheels analysis : well-to-wheels analysis of future automotive fuels and powertrains in the European context: Publications Office

European Council (2022): Fit for 55 package: Council adopts its position on three texts relating to the transport sector. European Council. Council of the European Union. Online verfügbar unter <https://www.consilium.europa.eu/en/press/press-releases/2022/06/02/fit-for-55-package-council-adopts-its-position-on-three-texts-relating-to-the-transport-sector/>, zuletzt geprüft am 11.12.2022

European Council (2023): 'Fit for 55': Council adopts regulation on CO2 emissions for new cars and vans. European Council. Council of the European Union. Online verfügbar unter <https://www.consilium.europa.eu/en/press/press-releases/2023/03/28/fit-for-55-council-adopts-regulation-on-co2-emissions-for-new-cars-and-vans/>, zuletzt geprüft am 27.04.23

European Parliament (2023): Fit for 55: Parliament and Council reach deal on greener aviation fuels. European Parliament (EP). Online verfügbar unter <https://www.europarl.europa.eu/news/en/press-room/20230424IPR82023/fit-for-55-parliament-and-council-reach-deal-on-greener-aviation-fuels>, zuletzt geprüft am 03.05.2023

EUROSTAT (2022a): EU energy mix and import dependency. Russia. EUROSTAT. Online verfügbar unter [https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Energy\\_imports\\_from\\_Russia\\_-\\_statistics&oldid=556977#EU\\_energy\\_dependency\\_on\\_Russia](https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Energy_imports_from_Russia_-_statistics&oldid=556977#EU_energy_dependency_on_Russia), zuletzt geprüft am 14.12.2022

EUROSTAT (2022b): EU energy statistical pocketbook and country datasheets. Hg. v. EUROSTAT. Online verfügbar unter [https://energy.ec.europa.eu/data-and-analysis/eu-energy-statistical-pocketbook-and-country-datasheets\\_en](https://energy.ec.europa.eu/data-and-analysis/eu-energy-statistical-pocketbook-and-country-datasheets_en), zuletzt geprüft am 14.12.2022

ExxonMobil (2022): ExxonMobil methanol to jet technology to provide new route for sustainable aviation fuel production. ExxonMobil. Online verfügbar unter [https://www.exxonmobilchemical.com/en/resources/library/library-detail/101116/exxonmobil\\_sustainable\\_aviation\\_fuel\\_production\\_en](https://www.exxonmobilchemical.com/en/resources/library/library-detail/101116/exxonmobil_sustainable_aviation_fuel_production_en), zuletzt geprüft am 30.03.2023

Eyring, Veronika; Isaksen, Ivar S.A.; Berntsen, Terje; Collins, William J.; Corbett, James J.; Endresen, Oyvind et al. (2010): Transport impacts on atmosphere and climate: Shipping. In: *Atmospheric environment (Oxford, England : 1994)* 44 (37), S. 4735–4771. DOI: 10.1016/j.atmosenv.2009.04.059

Fan, Z.; Xia, Z.; Shijin, Shuai; Jianhua, Xiao; Jianxin, W. (2010): Unregulated Emissions and Combustion Characteristics of Low-Content Methanol-Gasoline Blended Fuels. In: *Energy & Fuels*

Fette, Max; Brandstätt, Christine; Gils, Hans Christian; Gardian, Hedda; Pregger, Thomas; Schaffert, Johannes et al. (2020): Multi-Sektor-Kopplung - Modellbasierte Analyse der Integration erneuerbarer Stromerzeugung durch die Kopplung der Stromversorgung mit dem Wärme-, Gas- und Verkehrssektor. Online verfügbar unter <https://elib.dlr.de/135971/>

FfE (2020): The FfE Open Data Portal. Forschungsstelle für Energiewirtschaft e. V. (FfE). Online verfügbar unter <https://opendata.ffe.de/project/beniver/>, zuletzt geprüft am 12.04.2023

FFGaming (2004/2011): Freiwillige Feuerwehr Germering offizieller Jahresbericht 2004 & 2011. Hg. v. Freiwillige Feuerwehr Germering. Online verfügbar unter <https://silo.tips/download/freiwillige-feuerwehr-germering>, zuletzt geprüft am 26.07.2022

Fraunhofer Umsicht: Carbon2Chem - Baustein für den Klimaschutz. Online verfügbar unter <https://www.umsicht.fraunhofer.de/de/forschungslinien/kohlenstoffkreislauf.html>, zuletzt geprüft am 13.04.2023

Frenzel, Ina; Anderson, John E.; Lischke, Andreas; Eisenmann, Christine (2021): Renewable fuels in commercial transportation: Identification of early adopter, user acceptance, and policy implications. In: *Case Studies on Transport Policy* (9 [3]), S. 1245–1260. DOI: 10.1016/j.cstp.2021.06.010

Frerichs, Ludger (2022): Vortrag - Antriebssysteme für landwirtschaftliche Maschinen - Maschinen- und Verfahrenskonzepte mit elektrischen Antrieben. KTBL Fachgespräch, 10.03.2022

FuelCellsWorks (2021a): Namibia Announces \$9.4 Billion Green Hydrogen Project. In: *Fuel Cell Works*, 2021. Online verfügbar unter <https://fuelcellworks.com/news/namibia-announces-9-4-billion-green-hydrogen-project/>, zuletzt geprüft am 16.02.2023

FuelCellsWorks (2021b): Norway: MF "Hydra", the World's First Hydrogen Operated Ferry Wins Ship of the Year 2021. Fuel Cells Works. Online verfügbar unter <https://fuelcellworks.com/news/norway-mf-hydra-the-worlds-first-hydrogen-operated-ferry-wins-ship-of-the-year-2021/>, zuletzt geprüft am 30.03.2023

Gatzen, Christoph; Zähringer, Michael; Bothe, David (2020): Crediting System for Renewables Fuels: Functionality & Benefits. Report prepared for Neste. Hg. v. Frontier Economics. Online verfügbar unter <https://www.frontier-economics.com/media/4347/crediting-system-for-renewable-fuels.pdf>

Geldsetzer, Felix; Jahn, Ullrich; RÖMPP-Redaktion (2020): Methan. Georg Thieme Verlag. RÖMPP. Online verfügbar unter <https://roempp.thieme.de/lexicon/RD-13-01634>, zuletzt geprüft am 10.12.2022

Gestis: GESTIS Substance Database. Information system on hazardous substances of the German Social Accident Insurance. Institut für Arbeitsschutz der Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung (IFA). Online verfügbar unter <https://www.dguv.de/ifa/gestis/gestis-stoffdatenbank/index-2.jsp>

Gils, H. C.; Scholz, Y.; Pregger, T.; Luca de Tena, D.; Heide, D. (2017a): Integrated modelling of variable renewable energy-based power supply in Europe. In: *Energy* (123), S. 173–188

Gils, Hans Christian; Simon, Sonja; Soria, Rafael (2017b): 100% Renewable Energy Supply for Brazil--The Role of Sector Coupling and Regional Development. In: *Energies* (10 [1859]). DOI: 10.3390/en10111859

Göckeler, K.; Hacker, F.; Mottschall, M.; Blanck, R.; Görz, W.; Kasten, P. et al. (2020): Status quo und Perspektiven alternativer Antriebstechnologien für den schweren Straßengüterverkehr. 1. Teilbericht des Forschungs- und Dialogvorhabens „StratES: Strategie für die Elektrifizierung des Straßengüterverkehr“. Hg. v. Öko-Institut e.V. Berlin. Online verfügbar unter <https://www.oeko.de/fileadmin/oekodoc/StratES-Teilbericht1-Marktanalyse.pdf>, zuletzt geprüft am 11.12.2022

Graforce: Produkte. Graforce GmbH. Online verfügbar unter <https://www.graforce.com/produkte>, zuletzt geprüft am 30.03.2023

Graver, Brandon; Rutherford, Dan; Zheng, Sola (2020): CO2 emissions from commercial aviation. 2013, 2018, and 2019. Hg. v. International Council on Clean Transportation (ICCT). Online verfügbar unter <https://theicct.org/wp-content/uploads/2021/06/CO2-commercial-aviation-oct2020.pdf>, zuletzt geprüft am 30.03.2023

Grewe, Volker; Dahlmann, Katrin; Flink, Jan; Frömming, Christine; Ghosh, Robin; Gierens, Klaus et al. (2017): Mitigating the Climate Impact from Aviation: Achievements and Results of the DLR WeCare Project. In: *Aerospace* 4 (3), S. 34. DOI: 10.3390/aerospace4030034

Grimme, Wolfgang (2021): Luftverkehrsprognosen/ -szenarien und die Modellierung der Flugzeugflotte und des Treibstoffverbrauchs. Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V. Flughafenwesen & Luftverkehr (DLR Flughafenwesen & Luftverkehr), 2021

Habibic, Ajsa (2022): Wärtsilä, partners join forces to speed up ammonia engine development. Navingo BV - Offshore Energy. Online verfügbar unter <https://www.offshore-energy.biz/wartsila-partners-join-forces-to-speed-up-ammonia-engine-development/>, zuletzt geprüft am 19.05.2022

Haru Oni: Our sights are set on 2024 - and 1 m tons. Haru Oni. Online verfügbar unter <https://www.haruoni.com/#/en>, zuletzt geprüft am 21.04.2022

Hauglustaine, Didier; Paulot, Fabien; Collins, William; Derwent, Richard; Sand, Maria; Boucher, Olivier (2022): Climate benefit of a future hydrogen economy. In: *Commun Earth Environ* 3 (1). DOI: 10.1038/s43247-022-00626-z

Hauptmeier, Karl (2021): Industrializing PtL for the renewable markets of tomorrow. Hg. v. Norsk E-Fuel. Online verfügbar unter [https://www.dena.de/fileadmin/dena/Dokumente/Artikel/210615\\_Norsk-e-Fuel\\_Industrializing\\_PtL\\_for\\_the\\_renewable\\_markets\\_of\\_tomorrow.pdf](https://www.dena.de/fileadmin/dena/Dokumente/Artikel/210615_Norsk-e-Fuel_Industrializing_PtL_for_the_renewable_markets_of_tomorrow.pdf)

- Heine, Hannes (2017): Hoher Kraftstoffverbrauch: Berliner Polizei und BVG suchen Diesel-Lieferanten. Hg. v. Tagesspiegel. Online verfügbar unter <https://www.tagesspiegel.de/berlin/berliner-polizei-und-bvg-suchen-diesel-lieferanten-3855880.html>, zuletzt geprüft am 26.07.2022
- Heinemann, Christoph; Mendelvitch, Roman (2021): Sustainability dimensions of imported hydrogen-Working Paper 8/2021. Unter Mitarbeit von Anke Herold, Michael Jakob, Nele Kampfmeyer, Peter Kasten, Susanne Krieger, Tobias Schleicher und Dominik Seebach. Hg. v. Öko-Institut e.V. Online verfügbar unter <https://www.oeko.de/fileadmin/oekodoc/WP-imported-hydrogen.pdf>, zuletzt geprüft am 11.12.2022
- Hekkert, M.; Negro S.; Heimericks, G.; Harmsen, R.; Jong, Sander de (2011): Technological Innovation System Analysis. A manual for analysts. Hg. v. Utrecht University
- Herbinet, Olivier; Bartocci, Pietro; Grinberg Dana, Alon (2022): On the use of ammonia as a fuel – A perspective. In: *Fuel Communications* (11), S. 100064. DOI: 10.1016/j.jfueco.2022.100064
- Heumer, Wolfgang (2022): Synthetisches Erdgas für eine sauberere Schifffahrt. VDI Verlag GmbH. Online verfügbar unter <https://www.vdi-nachrichten.com/technik/mobilitaet/synthetisches-erdgas-fuer-eine-sauberere-schifffahrt/>, zuletzt geprüft am 10.12.2022
- Hoeller Electrolyzer (2022): Prometheus - PEM-Elektrolyse-Stacks der nächsten Generation. Hoeller Electrolyzer GmbH. Online verfügbar unter <https://www.hoeller-electrolyzer.com/entwicklungsziele.html>, zuletzt geprüft am 10.12.2022
- Hommen, Mario (2022): Marktübersicht: Die aktuellen Elektro-Transporter. Hg. v. Allgemeiner Deutscher Automobil-Club e.V. (ADAC). Online verfügbar unter <https://www.adac.de/rundums-fahrzeug/elektromobilitaet/kaufen/e-transporter/>, zuletzt geprüft am 30.03.2023
- Hoor, P.; Borken-Kleefeld, J.; Caro, D.; Dessens, O.; Endresen, O.; Gauss, M. et al. (2009): The impact of traffic emissions on atmospheric ozone and OH: results from QUANTIFY. In: *Atmos. Chem. Phys.* (9), S. 3113–3136. DOI: 10.5194/acp-9-3113-2009
- Horvath, Stephen; Fasihi, Mahdi; Breyer, Christian (2018): Techno-economic analysis of a decarbonized shipping sector: Technology suggestions for a fleet in 2030 and 2040. In: *Energy Conversion and Management* (164), S. 230–241. DOI: 10.1016/j.enconman.2018.02.098
- Howlett, Michael (2005): What is a policy instrument? Tools, mixes, and implementation styles. Hg. v. Eliadis, Pearl; Hill, Margaret M.; Howlett, Michael. In: *Designing Government: From Instruments to Governance*, McGill-Queen's University Press, S. 31–50
- Huppel, Gjalte (2001): Environmental policy instruments in a new era. Hg. v. Wissenschaftszentrum Berlin für Sozialforschung (WZB). Berlin (WZB Discussion Paper, FS II 01-404)
- Huss A; Weingerl P (2020): JEC Tank-to-Wheel report v5: Passenger cars. Unter Mitarbeit von Maas, H., Herudek, C., Wind, J., Hollweck, B., De Prada, L., Deix, S., Lahaussais, D., Faucon, R., Heurtaux, F., Perrier, B., Vidal, F., Gomes Marques, G., Prussi, M., Lonza, L., Yugo, M. and Hamje, H. Hg. v. Publications Office of the European Union. Luxembourg (EUR 30270 EN). Online verfügbar unter <https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/handle/JRC117560>

Hydrogen Central (2022): Pecém Industrial and Port Complex Presents its Green Hydrogen HUB at the Hydrogen Americas Summit 2022. Hydrogen Central. Online verfügbar unter <https://hydrogen-central.com/pecem-industrial-port-complex-presents-green-hydrogen-hub-hydrogen-americas-summit-2022/>, zuletzt geprüft am 11.12.2022

Hyundai: XCIENT Fuel Cell. Hg. v. Hyundai Motor Company. Online verfügbar unter <https://trucknbus.hyundai.com/global/en/products/truck/xcient-fuel-cell>, zuletzt geprüft am 30.03.2023

IATA (2021): Airline Industry Economic Performance - October 2021 - Report. Hg. v. International Air Transport Association (IATA). Online verfügbar unter <https://www.iata.org/en/iata-repository/publications/economic-reports/airline-industry-economic-performance---october-2021---report/>, zuletzt geprüft am 10.12.2022

ICAO (2021): Post-COVID-19 Forecasts Scenarios. International Civil Aviation Organization (ICAO). Online verfügbar unter <https://www.icao.int/sustainability/Pages/Post-Covid-Forecasts-Scenarios.aspx>, zuletzt geprüft am 10.12.2022

ICF International (2009): Current Methodologies in Preparing Mobile Source Port-Related Emission Inventories: Final Report. Hg. v. U.S. Environmental Protection Agency. Online verfügbar unter <https://www.epa.gov/sites/default/files/2016-06/documents/2009-port-inventory-guidance.pdf>, zuletzt geprüft am 12.04.2023

ICS (2021): Shipping Facts. International Chamber of Shipping (ICS). Online verfügbar unter <https://www.ics-shipping.org/>, zuletzt geprüft am 11.12.2022

IEA (2021a): Ammonia Technology Roadmap – Analysis. Hg. v. International Energy Agency (IEA). Online verfügbar unter <https://www.iea.org/reports/ammonia-technology-roadmap>, zuletzt geprüft am 10.12.2022

IEA (2021b): Global Hydrogen Review 2021. Hg. v. International Energy Agency (IEA). Online verfügbar unter <https://www.iea.org/reports/global-hydrogen-review-2021>, zuletzt geprüft am 10.12.2022

IEA (2021c): Global installed electrolysis capacity by technology, 2015-2020. International Energy Agency (IEA). Online verfügbar unter <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/global-installed-electrolysis-capacity-by-technology-2015-2020>, zuletzt geprüft am 30.03.2023

IEA (2021d): World Energy Outlook 2021. Hg. v. International Energy Agency (IEA). Online verfügbar unter <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2021>

IEA (2021e): About CCUS. Playing an important and diverse role in meeting global energy and climate goals. International Energy Agency (IEA). Online verfügbar unter <https://www.iea.org/reports/about-ccus>, zuletzt geprüft am 30.03.2023

IEA (2022a): Global hydrogen demand by production technology in the Net Zero Scenario, 2020-2030. International Energy Agency (IEA). Online verfügbar unter

<https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/global-hydrogen-demand-by-production-technology-in-the-net-zero-scenario-2020-2030>, zuletzt geprüft am 11.12.2022

IEA (2022b): Net Zero by 2050 Scenario. Data product. International Energy Agency (IEA). Online verfügbar unter <https://www.iea.org/data-and-statistics/data-product/net-zero-by-2050-scenario#tables-for-scenario-projections>, zuletzt geprüft am 14.12.2022

IEA (2022c): Direct Air Capture. Technology deep dive. International Energy Agency (IEA). Online verfügbar unter <https://www.iea.org/reports/direct-air-capture>, zuletzt geprüft am 30.03.2023

IEA (2022d): World natural gas demand by region, 1973-2020. International Energy Agency (IEA). Online verfügbar unter <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/world-natural-gas-demand-by-region-1973-2020>, zuletzt geprüft am 30.03.2023

ifeu (2017): Umweltbilanzierung Fernlinienbus, Ergebnisbericht. Hg. v. Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg GmbH (ifeu). Online verfügbar unter [https://www.ifeu.de/fileadmin/uploads/20171026\\_Ergebnisse\\_Fernlinienbus\\_Final.pdf](https://www.ifeu.de/fileadmin/uploads/20171026_Ergebnisse_Fernlinienbus_Final.pdf), zuletzt geprüft am 26.07.2022

IMO (2018): IMO's work to cut GHG emissions from ships. International Maritime Organization (IMO). Online verfügbar unter <https://www.imo.org/en/MediaCentre/HotTopics/Pages/Cutting-GHG-emissions.aspx>, zuletzt geprüft am 10.12.2022

IMO (2019): Initial IMO GHG Strategy. International Maritime Organization (IMO). Online verfügbar unter <https://www.imo.org/en/MediaCentre/HotTopics/Pages/Reducing-greenhouse-gas-emissions-from-ships.aspx>, zuletzt geprüft am 22.01.2023

IMO (2021): 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

IndexMundi: Kerosin monatlicher Preis - Euro pro Gallone. Hg. v. IndexMundi. Online verfügbar unter <https://www.indexmundi.com/de/rohstoffpreise/?ware=kerosin&monate=60&wahrung=eur>

INFRAS (2019): HBEFA. Handbuch für Emissionsfaktoren des Straßenverkehrs. Version 4.1. Hg. v. INFRAS. Online verfügbar unter <https://www.hbefa.net/d/index.html>, zuletzt geprüft am 12.04.2023

IPCC (2021): Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Unter Mitarbeit von V. Masson-Delmotte, P. Zhai, A. Pirani, S. L. Connors, C. Péan, S. Berger und et al. Hg. v. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA. Online verfügbar unter [https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC\\_AR6\\_WGI\\_FullReport.pdf](https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC_AR6_WGI_FullReport.pdf), zuletzt geprüft am 10.12.2022

IPCC (2022): Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change. Working Group III contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Final Draft 2022. Hg. v. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Online verfügbar

unter <https://www.ipcc.ch/report/sixth-assessment-report-working-group-3/>, zuletzt geprüft am 11.12.2022

IRENA (2013): Renewables Readiness Assessment. Design to Action. Unter Mitarbeit von International Institute of Sustainable Development (IISD). Hg. v. International Renewable Energy Agency (IRENA). Online verfügbar unter [https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2013/RRA\\_Design\\_to\\_Action.pdf?rev=04c75bcec4874a6096bacf3c66c3ff59](https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2013/RRA_Design_to_Action.pdf?rev=04c75bcec4874a6096bacf3c66c3ff59), zuletzt geprüft am 12.12.2022

IRENA (2021): Renewable Power Generation Costs in 2020. Hg. v. International Renewable Energy Agency (IRENA). Online verfügbar unter <https://www.irena.org/publications/2021/Jun/Renewable-Power-Costs-in-2020>

IRENA (2022a): Geopolitics of the Energy Transformation: The Hydrogen Factor. Hg. v. International Renewable Energy Agency (IRENA). Abu Dhabi. Online verfügbar unter [https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2022/Jan/IRENA\\_Geopolitics\\_Hydrogen\\_2022.pdf?rev=1cfe49eee979409686f101ce24ffd71a](https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2022/Jan/IRENA_Geopolitics_Hydrogen_2022.pdf?rev=1cfe49eee979409686f101ce24ffd71a), zuletzt geprüft am 11.12.2022

IRENA (2022b): IRENASTAT Online Data Query Tool. Installed renewable electricity capacity (MW) by Region/country/area, Technology and Year-PxWeb 2020 v1. International Renewable Energy Agency (IRENA). Online verfügbar unter [https://pxweb.irena.org/pxweb/en/IRENASTAT/IRENASTAT\\_\\_Power%20Capacity%20and%20Generation/RECAP\\_2022\\_cycle2.px/](https://pxweb.irena.org/pxweb/en/IRENASTAT/IRENASTAT__Power%20Capacity%20and%20Generation/RECAP_2022_cycle2.px/), zuletzt geprüft am 11.12.2022

IRENA (2022c): Renewable Energy Statistics 2022. Hg. v. International Renewable Energy Agency (IRENA). Abu Dhabi

ISO 16861: ISO 16861:2015: Petroleum products - Fuels (class F) - Specifications of dimethyl ether (DME). Online verfügbar unter <https://www.iso.org/standard/57835.html>

ISO 8217: ISO 8217:2017: Petroleum products - Fuels (class F) - Specifications of marine fuels. Online verfügbar unter <https://www.iso.org/standard/64247.html>

ITF (2020): Navigating Towards Cleaner Maritime Shipping. Lessons From the Nordic Region. Hg. v. International Transport Forum Policy Papers Nr. 80. Paris. Online verfügbar unter <https://www.itf-oecd.org/sites/default/files/docs/navigating-cleaner-maritime-shipping.pdf>, zuletzt geprüft am 22.01.2023

iTP (2021): Gleitende Mittelfristprognose für den Güter- und Personenverkehr. Mittelfristprognose Winter 2020/21. Hg. v. Intraplan Consult GmbH (iTP). Online verfügbar unter [https://bmdv.bund.de/SharedDocs/DE/Anlage/G/gleitende-mittelfristprognose-winter-2020-2021.pdf?\\_\\_blob=publicationFile](https://bmdv.bund.de/SharedDocs/DE/Anlage/G/gleitende-mittelfristprognose-winter-2020-2021.pdf?__blob=publicationFile)

IVW (2022): Auflagenstärke deutscher Tageszeitungen. Informationsgemeinschaft zur Feststellung der Verbreitung von Werbeträgern e. V. (IVW). Online verfügbar unter <https://www.ivw.de/>



James, Brian D.; Huya-Kouadio, Jennie M.; Houchins, Cassidy; Desantis, Daniel A. (2018): Mass Production Cost Estimation of Direct H<sub>2</sub> PEM Fuel Cell Systems for Transportation Applications: 2018 Update. Hg. v. U.S. Department of Energy. Online verfügbar unter <https://www.energy.gov/sites/default/files/2020/02/f71/fcto-sa-2018-transportation-fuel-cell-cost-analysis-2.pdf>

Jöhrens, J.; Allekotte, F. H.; Helms, H.; Räder, D.; Köllermeier, N.; Waßmuth, V. (2022): Vergleichende Analyse der Potentiale von Antriebstechnologien für Lkw im Zeithorizont 2030. Teilbericht im Rahmen des Vorhabens „Elektrifizierungspotential des Güter- und Busverkehrs - My eRoads“. Institut für Energie- und Umweltforschung (ifeu); PTV Transport Consult. Online verfügbar unter [https://www.ifeu.de/fileadmin/uploads/2022-02-04\\_-\\_My\\_eRoads\\_-\\_Potentiale\\_Lkw-Antriebstechnologien\\_-\\_final\\_01.pdf](https://www.ifeu.de/fileadmin/uploads/2022-02-04_-_My_eRoads_-_Potentiale_Lkw-Antriebstechnologien_-_final_01.pdf), zuletzt geprüft am 11.12.2022

Jülch, Verena (2016): Comparison of electricity storage options using levelized cost of storage (LCOS) method. In: *Applied Energy* 183, S. 1594–1606. DOI: 10.1016/j.apenergy.2016.08.165

Kaiser, Doreen; Beckmann, Luise; Walter, Jan; Bertau, Martin (2021): Conversion of Green Methanol to Methyl Formate. In: *Catalysts* 11 (7), S. 869. DOI: 10.3390/catal11070869

Kalinowska, Dominika; Kuhfeld, Hartmut; Kunert, Uwe; Rülcke, Oliver (2005): Die Abgaben auf Kraftfahrzeuge in Europa im Jahr 2005. Hg. v. Deutsches Institut für Wirtschaftsforschung (DIW). Berlin. Online verfügbar unter [https://www.diw.de/documents/publikationen/73/diw\\_01.c.43883.de/diwkompakt\\_2005-012.pdf](https://www.diw.de/documents/publikationen/73/diw_01.c.43883.de/diwkompakt_2005-012.pdf), zuletzt geprüft am 11.12.2022

Kampker, Achim; Vallée, Dirk; Schnettler, Armin (2018): Elektromobilität - Grundlagen einer Zukunftstechnologie. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg

Kang, Jincan; He, Shun; Zhou, Wei; Shen, Zheng; Li, Yangyang; Chen, Mingshu et al. (2020): Single-pass transformation of syngas into ethanol with high selectivity by triple tandem catalysis. In: *Nature communications* 11 (1), S. 827. DOI: 10.1038/s41467-020-14672-8

Kattel, Rainer; Mazzucato, Mariana; Ryan-Collins, Josh; Sharpe, Simon (2018): The economics of change: Policy and appraisal for missions, market shaping and public purpose. Hg. v. Institute for Innovation and Public Purpose (UCL). Online verfügbar unter <https://www.ucl.ac.uk/bartlett/public-purpose/publications/2018/jul/economics-change-policy-and-appraisal-missions-market-shaping-and-public>, zuletzt geprüft am 11.12.2022

KBA (2021a): Fahrzeugzulassungen (FZ), Bestand an Kraftfahrzeugen nach Umwelt-Merkmalen. Hg. v. Kraftfahrt-Bundesamt (KBA) (FZ 13). Online verfügbar unter [https://www.kba.de/SharedDocs/Downloads/DE/Statistik/Fahrzeuge/FZ13/fz13\\_2021.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=4](https://www.kba.de/SharedDocs/Downloads/DE/Statistik/Fahrzeuge/FZ13/fz13_2021.pdf?__blob=publicationFile&v=4), zuletzt geprüft am 10.12.2022

KBA (2021b): Neuzulassungen von Personenkraftwagen (Pkw) im Jahresverlauf 2021 nach Marken und alternativen Antrieben - korrigierte Fassung. Kraftfahrt-Bundesamt (KBA) (Pressemitteilung Nr. 51/2021). Online verfügbar unter [https://www.kba.de/DE/Presse/Pressemitteilungen/AlternativeAntriebe/2021/pm51\\_2021\\_Antriebe\\_11\\_21\\_komplett.html](https://www.kba.de/DE/Presse/Pressemitteilungen/AlternativeAntriebe/2021/pm51_2021_Antriebe_11_21_komplett.html), zuletzt geprüft am 10.12.2022

KBA (2022a): Bestand an Kraftfahrzeugen und Kraftfahrzeuganhängern nach Herstellern und Handelsnamen. Blatt FZ 2.3. Hg. v. Kraftfahrt-Bundesamt (KBA). Online verfügbar unter [https://www.kba.de/DE/Statistik/Produktkatalog/produkte/Fahrzeuge/fz2\\_b\\_uebersicht.html](https://www.kba.de/DE/Statistik/Produktkatalog/produkte/Fahrzeuge/fz2_b_uebersicht.html)

KBA (2022b): Der Fahrzeugbestand am 1. Januar 2022. Kraftfahrt-Bundesamt (KBA) (Pressemitteilung Nr. 10/2022). Online verfügbar unter [https://www.kba.de/DE/Presse/Pressemitteilungen/Fahrzeugbestand/2022/pm10\\_fz\\_bestand\\_pm\\_komplett.html](https://www.kba.de/DE/Presse/Pressemitteilungen/Fahrzeugbestand/2022/pm10_fz_bestand_pm_komplett.html), zuletzt geprüft am 10.12.2022

KBA (2022c): Jahresbilanz - Der Fahrzeugbestand im Überblick am 1. Januar 2022 gegenüber 1. Januar 2021. Hg. v. Kraftfahrt-Bundesamt (KBA). Online verfügbar unter [https://www.kba.de/DE/Statistik/Fahrzeuge/Bestand/Jahresbilanz\\_Bestand/2022/2022\\_b\\_ueberblick\\_pdf.html](https://www.kba.de/DE/Statistik/Fahrzeuge/Bestand/Jahresbilanz_Bestand/2022/2022_b_ueberblick_pdf.html), zuletzt geprüft am 10.12.2022

KBA (2022d): Statistik - Neuzulassungen von Personenkraftwagen nach Marken und Modellreihen. Kraftfahrt-Bundesamt (KBA). Online verfügbar unter [https://www.kba.de/DE/Statistik/Produktkatalog/produkte/Fahrzeuge/fz10/fz10\\_gentab.html](https://www.kba.de/DE/Statistik/Produktkatalog/produkte/Fahrzeuge/fz10/fz10_gentab.html), zuletzt geprüft am 10.12.2022

Kemp, René; Pontoglio, Serena (2011): The innovation effects of environmental policy instruments – A typical case of the blind men and the elephant? In: *Ecological Economics* (72), S. 28–36

Kessinger, Susan; Minkos, Andrea; Dauert, Ute; Feigenspan, Stefan; Mues, Andrea (2022): Luftqualität 2021 - Vorläufige Auswertung. Hg. v. Umweltbundesamt (UBA). Online verfügbar unter <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/luftqualitaet-2021>, zuletzt geprüft am 06.04.2023

Kivimaa, Paula; Kern, Florian (2016): Creative destruction or mere niche support? Innovation policy mixes for sustainability transitions. In: *Research Policy* (45), S. 205–217

Klann, Uwe (2018): AP 7.1, Strang 1: Konzentration auf Erdöl- und Erdgasmärkten (IZES, AF-EM), Verbundvorhaben BEniVer. Teilvorhaben: Akzeptanz und Markteinführungsmechanismen. Hg. v. unveröffentlicht

Klann, Uwe (2021): AP 7.1, Strang 1: Konzentration auf Erdöl- und Erdgasmärkten (IZES, AF-EM), aktualisiert, Verbundvorhaben BEniVer. Teilvorhaben: Akzeptanz und Markteinführungsmechanismen. Hg. v. unveröffentlicht

Klimaschutz-Portal (2017): Warum ist Kerosin von der Energiebesteuerung befreit? Klimaschutz-Portal. Online verfügbar unter <https://www.klimaschutz-portal.aero/faq/kerosinsteuer/>, zuletzt geprüft am 22.01.2023

Koalitionsvertrag (2021): Koalitionsvertrag 2021 – 2025 zwischen der Sozialdemokratischen Partei Deutschlands (SPD), BÜNDNIS 90 / DIE GRÜNEN und den Freien Demokraten (FDP). Mehr Fortschritt wagen Bündnis für Freiheit, Gerechtigkeit und Nachhaltigkeit. Hg. v. Die Bundesregierung. Online verfügbar unter <https://www.bundesregierung.de/resource/blob/974430/1990812/04221173eef9a6720059cc353d759a2b/2021-12-10-koav2021-data.pdf?download=1>, zuletzt geprüft am 22.01.2023

Koschany, Franz; Schlereth, David; Hinrichsen, Olaf (2016): On the kinetics of the methanation of carbon dioxide on coprecipitated NiAl(O). In: *Applied Catalysis B: Environmental* (181), S. 504–516. DOI: 10.1016/j.apcatb.2015.07.026

Krail, Michael; Speth, Daniel; Gnann, Till; Wietschel, Martin (2021): Langfristszenarien für die Transformation des Energiesystems in Deutschland Treibhausgasneutrale Hauptszenarien - Modul Verkehr. Unter Mitarbeit von Consentec GmbH, ifeu und TU Berlin. Hg. v. Fraunhofer ISI. Online verfügbar unter [https://www.langfristszenarien.de/enertile-explorer-wAs-sets/docs/LFS3\\_Langbericht\\_Verkehr\\_final.pdf](https://www.langfristszenarien.de/enertile-explorer-wAs-sets/docs/LFS3_Langbericht_Verkehr_final.pdf), zuletzt geprüft am 10.12.2022

Kramer, Ulrich (2022): Strombasierte Kraftstoffe für die Anwendung im Straßenverkehr. Frageunde, 12.09.2022. Persönliche Kommunikation (U. Kramer als Vertretung für Ford)

Kramer, Ulrich; Bothe, David; Gatzen, Christoph; Reger, Maximilian; Lothmann, Marion (2021): Future Fuels: FVV Fuels Study IV. Transformation of Mobility to the GHG-neutral Post-fossil Age. Hg. v. FVV e.V. Online verfügbar unter [https://www.fvv-net.de/fileadmin/Stories/020.50\\_Sechs\\_Thesen\\_zur\\_Klimaneutralitaet\\_des\\_europaeischen\\_Verkehrssektors/FVV\\_\\_Future\\_Fuels\\_\\_StudyIV\\_The\\_Transformation\\_of\\_Mobility\\_\\_H1269\\_2021-10\\_\\_EN.pdf](https://www.fvv-net.de/fileadmin/Stories/020.50_Sechs_Thesen_zur_Klimaneutralitaet_des_europaeischen_Verkehrssektors/FVV__Future_Fuels__StudyIV_The_Transformation_of_Mobility__H1269_2021-10__EN.pdf), zuletzt geprüft am 10.12.2022

Kroher, Thomas (2021): Kostenvergleich Erdgas, Benzin, Diesel: Lohnen sich CNG-Modelle? Allgemeiner Deutscher Automobil-Club e.V. (ADAC). Online verfügbar unter <https://www.adac.de/rund-ums-fahrzeug/auto-kaufen-verkaufen/autokosten/erdgas-verbrenner-kostenvergleich/>, zuletzt geprüft am 10.12.2022

Kroher, Thomas (2022): E10: Das beste Mittel gegen die hohen Spritpreise. Allgemeiner Deutscher Automobil-Club e.V. (ADAC). Online verfügbar unter <https://www.adac.de/verkehr/tanken-kraftstoff-antrieb/benzin-und-diesel/e10-tanken/>, zuletzt geprüft am 10.12.2022

Krupnick, Alan; Bergmann, Aaron (2022): Incentives for Clean Hydrogen Production in the Inflation Reduction Act. Hg. v. Resources for the Future (RFF)

KSG (2021): Bundes-Klimaschutzgesetz. KSG. Bundesministerium der Justiz, vom "Vom 12.12.2019 (BGBl. I S. 2513), das durch Artikel 1 des Gesetzes vom 18.08.2021 (BGBl. I S. 3905) geändert worden ist". Online verfügbar unter <https://www.gesetze-im-internet.de/ksg/index.html>, zuletzt geprüft am 22.01.2023

Lancaster, Lizzy (2021): Hive hydrogen plans green ammonia plant in South Africa. In: *Argus Media Group*, 2021. Online verfügbar unter <https://www.argusmedia.com/en/news/2283594-hive-hydrogen-plans-green-ammonia-plant-in-south-africa>, zuletzt geprüft am 16.02.2023

Landälv, Ingvar; Waldheim, Lars; Maniatis, Kyriakos (2018): BUILDING up the future. Cost of biofuel. Hg. v. Publications Office of the European Union. Luxembourg

Le Galès, Patrick (2011): Policy Instruments and Governance. Hg. v. Bevir, Mark. In: *The SAGE Handbook of Governance*, SAGE Publications Ltd, S. 142–159

Lee, D. S.; Fahey, D. W.; Skowron, A.; Allen, M. R.; Burkhardt, U.; Chen, Q. et al. (2021): The contribution of global aviation to anthropogenic climate forcing for 2000 to 2018. In: *Atmospheric environment* (244). DOI: 10.1016/j.atmosenv.2020.117834

Lehmann, Paul; Korte, Klaas; Gawel, Erik; Jöhrens, Julius; Lambrecht, Udo (2020): Technologieutralität im Kontext der Verkehrswende. Kritische Beleuchtung eines Postulats. Hg. v.

Agora Verkehrswende. Online verfügbar unter <https://www.agora-verkehrswende.de/veroeffentlichungen/technologieneutralitaet-im-kontext-der-verkehrswende-2/>, zuletzt geprüft am 11.12.2022

Lehr, Ulrike; Lutz, Christian; Edler, Dietmar (2012): Green jobs? Economic impacts of renewable energy in Germany. In: *Energy Policy* (47), S. 358–364. DOI: 10.1016/j.enpol.2012.04.076

Leipold, Alexandra; Aptsiauri, Gubaz; Ayazkhani, Amir; Bauder, Uwe; Becker, Richard-Gregor; Berghof, Ralf et al. (2021): DEPA 2050 - Development Pathways for Aviation up to 2050. - Final Report. Hg. v. Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V. Flughafenwesen & Luftverkehr (DLR Flughafenwesen & Luftverkehr). Online verfügbar unter [https://www.dlr.de/fw/desktopdefault.aspx/tabid-2937/4472\\_read-72217/](https://www.dlr.de/fw/desktopdefault.aspx/tabid-2937/4472_read-72217/), zuletzt geprüft am 10.12.2022

Lewis, Jonathan (2018): Fuels Without Carbon. Prospects and the Pathway Forward for Zero-Carbon Hydrogen and Ammonia Fuels. Hg. v. Clean Air Task Force. Online verfügbar unter <https://www.catf.us/resource/fuels-without-carbon/>, zuletzt geprüft am 12.04.2023

Lindner, Stephen H.; Peters, B. Guy (1989): Instruments of Government: Perceptions and Contexts. In: *Journal of Public Policy* Vol. 9 (1 (Jan.-Mar. 1989)), S. 35–58

LT 15/6425 (29.01.2015): Drucksache 15/6425. Stellungnahme des Innenministeriums Bewirtschaftung des Fuhrparks der Polizei (Landtag von Baden-Württemberg). Online verfügbar unter [https://www.landtag-bw.de/files/live/sites/LTBW/files/dokumente/WP15/Drucksachen/6000/15\\_6425\\_D.pdf](https://www.landtag-bw.de/files/live/sites/LTBW/files/dokumente/WP15/Drucksachen/6000/15_6425_D.pdf), zuletzt geprüft am 20.04.2023

Luk, Ho Ting; Mondelli, Cecilia; Ferré, Daniel Curulla; Stewart, Joseph A.; Pérez-Ramírez, Javier (2017): Status and prospects in higher alcohols synthesis from syngas. In: *Chemical Society reviews* 46 (5), S. 1358–1426. DOI: 10.1039/c6cs00324a

Lutz, Christian; Becker, Lisa; Kemmler, Andreas (2021): Socioeconomic Effects of Ambitious Climate Mitigation Policies in Germany. In: *Sustainability* (13 [11]), S. 6247. DOI: 10.3390/su13116247

Manisalidis, Ioannis; Stavropoulou, Elisavet; Stavropoulos, Agathangelos; Bezirtzoglou, Eugenia (2020): Environmental and Health Impacts of Air Pollution: A Review. In: *Frontiers in public health* 8, S. 14. DOI: 10.3389/fpubh.2020.00014

Mao, Xiaoli; Rutherford, Dan; Osipova, Liudmila; Comer, Bryan (2020): Refueling assessment of a zero-emission container corridor between China and the United States: Could hydrogen replace fossil fuels? Hg. v. International Council on Clean Transportation (ICCT). Online verfügbar unter <https://theicct.org/wp-content/uploads/2021/06/Zero-emission-container-corridor-hydrogen-3.5.2020.pdf>, zuletzt geprüft am 30.03.2023

Matschoss, Patrick; Hauser, Eva; Müller-Langer, Franziska; Schröder, Jörg; Brand, Urte; Dietrich, Ralph-Uwe et al. (2020): Synthetische Kraftstoffe – Ökonomie, Gesellschaft, Nachhaltig-

keit. In: *Forschung für den European Green Deal. Beiträge zur FVEE-Jahrestagung 2020*. Online verfügbar unter <https://www.fvee.de/wp-content/uploads/2022/01/th2020.pdf>, zuletzt geprüft am 12.12.2022

Mazzucato, Mariana (2018): Mission-Oriented Research & Innovation in the European Union. A problem-solving approach to fuel innovation-led growth. Hg. v. European Commission: Directorate-General for Research and Innovation. Luxembourg. Online verfügbar unter <https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/5b2811d1-16be-11e8-9253-01aa75ed71a1/language-en>, zuletzt geprüft am 11.12.2022

Mercedes-Benz (2022): VISION EQXX übertrifft eigenen Effizienzrekord. Mercedes-Benz Group AG. Online verfügbar unter <https://group.mercedes-benz.com/innovation/produktinnovation/technologie/vision-eqxx-effizienzrekord-england.html>, zuletzt geprüft am 30.03.2023

Mertens, Mariano; Grewe, Volker; Rieger, Vanessa S.; Jöckel, Patrick (2018): Revisiting the contribution of land transport and shipping emissions to tropospheric ozone. In: *Atmos. Chem. Phys.* 18 (8), S. 5567–5588. DOI: 10.5194/acp-18-5567-2018

Michailos, Stavros; McCord, Stephen; Sick, Volker; Stokes, Gerald; Styring, Peter (2019): Dimethyl ether synthesis via captured CO<sub>2</sub> hydrogenation within the power to liquids concept: A techno-economic assessment. In: *Energy Conversion and Management* (184), S. 262–276. DOI: 10.1016/j.enconman.2019.01.046

Millinger, Markus; Tafarte, Philip; Jordan, Matthias; Musonda, Frazer; Chan, Katrina; Meisel, Kathleen; Aliabadi, Danial Esmaeili (2022): A model for cost- and greenhouse gas optimal material and energy allocation of biomass and hydrogen. In: *SoftwareX* 20, S. 101264. DOI: 10.1016/j.softx.2022.101264

Ministerio de Minas y Energia (2021): Hoja de Ruta de Hidrógeno de Colombia. Unter Mitarbeit von BID und UK Government. Hg. v. Ministerio de Minas y Energia Colombia. Online verfügbar unter [https://www.minenergia.gov.co/static/ruta-hidrogeno/src/document/Hoja%20Ruta%20Hidrogeno%20Colombia\\_2810.pdf](https://www.minenergia.gov.co/static/ruta-hidrogeno/src/document/Hoja%20Ruta%20Hidrogeno%20Colombia_2810.pdf), zuletzt geprüft am 16.02.2023

Ministries of Energy and Mining Chile (2021): Chile's Green Hydrogen Strategy and investment opportunities. Hg. v. Ministries of Energy and Mining. Gobierno de Chile. Online verfügbar unter [https://energia.gob.cl/sites/default/files/documentos/green\\_h2\\_strategy\\_chile.pdf](https://energia.gob.cl/sites/default/files/documentos/green_h2_strategy_chile.pdf), zuletzt geprüft am 11.12.2022

Mirza, Adal (2021): Oman signs land deal for new green hydrogen plant. In: *Argus Media Group*, 2021. Online verfügbar unter <https://www.argusmedia.com/en/news/2247165-oman-signs-land-deal-for-new-green-hydrogen-plant>, zuletzt geprüft am 11.12.2022

Misculin, Nicolás; Geist, Agustin (2021): Argentina, Fortescue unveils \$8.4 bln green hydrogen investment plan. In: *Reuters Media*, 2021. Online verfügbar unter <https://www.reuters.com/business/sustainable-business/argentina-fortescue-unveils-84-bln-green-hydrogen-investment-plan-2021-11-01/>, zuletzt geprüft am 16.02.2023

Morgan, Sam (2020): Dänemark und Norwegen bauen weltgrößte Wasserstoff-Fähre. EU-RACTIV Media Network BV. Online verfügbar unter <https://www.euractiv.de/section/energie->

und-umwelt/news/daenemark-und-norwegen-bauen-weltgroesste-wasserstoff-faehre/, zuletzt geprüft am 30.03.2023

Morgen, S.; Schmidt, M.; Steppe, J.; Wörlen Christine (2022): Fair Green Hydrogen. Chance or Chimera in Morocco, Niger and Senegal? Hg. v. Arepo GmbH und Rosa-Luxemburg-Stiftung. Online verfügbar unter [https://arepoconsult.com/wp-content/uploads/2022/04/Studie\\_Fair\\_Hydrogen.pdf](https://arepoconsult.com/wp-content/uploads/2022/04/Studie_Fair_Hydrogen.pdf), zuletzt geprüft am 11.12.2022

Mottschall, M.; Kasten, P.; Minnich, L.; Kühnel, S. (2019): Sensitivitäten zur Bewertung der Kosten verschiedener Energieversorgungsoptionen des Verkehrs bis zum Jahr 2050. 114/2019. Hg. v. Umweltbundesamt (UBA). Online verfügbar unter <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/sensitivitaeten-zur-bewertung-der-kosten>, zuletzt geprüft am 11.12.2022

MPP (2022): Making Net-Zero Aviation Possible - An industry-backed, 1.5°C-aligned transition strategy. Hg. v. Mission Possible Partnership (MPP). Online verfügbar unter <https://missionpossiblepartnership.org/wp-content/uploads/2023/01/Making-Net-Zero-Aviation-possible.pdf>, zuletzt geprüft am 15.03.2023

Mukhopadhyaya, Jayant; Rutherford, Dan (2022): Performance Analysis of Evolutionary Hydrogen-Powered Aircraft. Hg. v. International Council on Clean Transportation (ICCT). Online verfügbar unter <https://theicct.org/wp-content/uploads/2022/01/LH2-aircraft-white-paper-A4-v4.pdf>, zuletzt geprüft am 11.12.2022

Neste (2023): Brussels Airlines starts new year with a first delivery of Neste MY Sustainable Aviation Fuel to Brussels Airport via CEPS pipeline (Pressemitteilung). Neste. Online verfügbar unter <https://www.neste.com/releases-and-news/renewable-solutions/brussels-airlines-starts-new-year-first-delivery-neste-my-sustainable-aviation-fuel-brussels-airport>, zuletzt geprüft am 15.03.2023

Nguyen, Do Minh; Bergfeld, Moritz; Eisenmann, Christine; Finger, Johannes; Anderson, John E. (2021): Akzeptanz und potenzielle Nutzung erneuerbarer Kraftstoffe bei deutschen Pkw-BesitzerInnen. Bericht - Auswertung der Befragung. Hg. v. Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V. Verkehrsforschung (DLR Verkehrsforschung). Online verfügbar unter [https://verkehrsforschung.dlr.de/public/documents/2021/BEniVer\\_Ergebnisbericht.pdf](https://verkehrsforschung.dlr.de/public/documents/2021/BEniVer_Ergebnisbericht.pdf), zuletzt geprüft am 10.12.2022

Nitnaware, Pravin Tukaram; Suryawanshi, Jiwak G. (2019): Effects of Exhaust Gas Recirculation on Performance and Emission Characteristic of SI Engine using Hydrogen and CNG Blends. In: *J. Inst. Eng. India Ser. C* (100 [2]), S. 289–294. DOI: 10.1007/s40032-018-0440-z

Nordic: Production and Products. Nordic Electrofuel AS. Online verfügbar unter <https://nordicelectrofuel.no/>, zuletzt geprüft am 12.04.2022

Norsk: Technological force and industrial-strength combined. Norsk E-Fuel. Online verfügbar unter <https://www.norsk-e-fuel.com/technology>, zuletzt geprüft am 21.04.2022

NPM (2021): Roadmap – Markthochläufe alternativer Antriebe und Kraftstoffe aus technologischer Perspektive. Hg. v. Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI). Nationale Plattform Zukunft der Mobilität (NPM). Online verfügbar unter [https://www.plattform-zukunft-mobilitaet.de/wp-content/uploads/2021/04/NPM\\_AG2\\_Technologie\\_Roadmap.pdf](https://www.plattform-zukunft-mobilitaet.de/wp-content/uploads/2021/04/NPM_AG2_Technologie_Roadmap.pdf)

O’Sullivan, Marlene; Edler, Dietmar (2020): Gross Employment Effects in the Renewable Energy Industry in Germany—An Input–Output Analysis from 2000 to 2018. In: *Sustainability* (12 [15]), S. 61–63. DOI: 10.3390/su12156163

OECD (2021): Public Sector Innovation Facets. MISSION-ORIENTED INNOVATION. Hg. v. Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD), Observatory of Public Sector Innovation (OPSI) und European Commission. Online verfügbar unter <https://oecd-opsi.org/wp-content/uploads/2021/10/OECD-Innovation-Facets-Brief-Mission-Oriented-Innovation-2021.pdf>, zuletzt geprüft am 11.12.2022

Pache, Eckhard (2005): Möglichkeiten der Einführung einer Kerosinsteuer auf innerdeutschen Flügen. Hg. v. Umweltbundesamt (UBA) (12/05). Online verfügbar unter <https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/publikation/long/2853.pdf>, zuletzt geprüft am 11.12.2022

Packroff, Jonathan; Carroll, Sean Goulding (2022): EU einigt sich auf Verbrenner-Aus ab 2035. In: *EURACTIV*, 2022. Online verfügbar unter <https://www.euractiv.de/section/verkehr/news/eu-einigt-sich-auf-verbrenner-aus-ab-2035/>, zuletzt geprüft am 11.12.2022

Pagenkopf, Johannes; Jäger, Victoria Carolin; Konrad, Marcel; Böhm, Mathias (2022): Alternative Antriebe für Rangierlokomotiven. In: Eisenbahnwesen-Seminar Wintersemester 2021/2022. Online verfügbar unter <https://elib.dlr.de/148621/>, zuletzt geprüft am 10.12.2022

Pfenninger, Stefan; Staffell, Iain (2016a): Long-term patterns of European PV output using 30 years of validated hourly reanalysis and satellite data. In: *Energy* 114, S. 1251–1265. DOI: 10.1016/j.energy.2016.08.060

Pfenninger, Stefan; Staffell, Iain (2016b): Using bias-corrected reanalysis to simulate current and future wind power output. In: *Energy* 114, S. 1224–1239. DOI: 10.1016/j.energy.2016.08.068

Pichlmaier, Simon; Regett, Anika; Kigle, Stephan; Haas, Sofia; Feinauer, Mario; Oswald, Matthias (2021): Ökobilanzen synthetischer Kraftstoffe - Methodikleitfaden. Hg. v. Forschungsstelle für Energiewirtschaft e. V. (FfE). Online verfügbar unter [https://www.ffe.de/wp-content/uploads/2018/06/20210906\\_Methodikleitfaden\\_BEniVer.pdf](https://www.ffe.de/wp-content/uploads/2018/06/20210906_Methodikleitfaden_BEniVer.pdf)

Pregger, Thomas; Flachsbarth, Franziska; Jentsch, Mareike; Dierstein, Constantin (2019): Comparison of spatially and temporally resolved energy system models with a focus on Germany's future power supply. In: *Applied Energy* 255, S. 113889. Online verfügbar unter <https://elib.dlr.de/131947/>

Prunnbauer, J. G. (2022): Strombasierte Kraftstoffe für die Anwendung in der Rückverstromung, 19.09.2022. Persönliche Kommunikation (J.G. Prunnbauer als Vertretung für MethQuest)

PtX Hub (2021): Our framework for assessing truly sustainable Power-to-X. International PtX Hub. Online verfügbar unter <https://ptx-hub.org/eesg-framework-for-sustainable-ptx/>, zuletzt geprüft am 10.12.2022

Quantron (2022): QHM FCEV. Neue Maßstäbe im schweren Fernverkehr. Quantron AG. Online verfügbar unter <https://www.quantron.net/q-truck/q-heavy/qhm-fcev/?fbclid=I>

Raab, Moritz; Körner, Robin; Dietrich, Ralph-Uwe (2022): Techno-economic assessment of renewable hydrogen production and the influence of grid participation. In: *International Journal of Hydrogen Energy* (47 [63]), S. 26798–26811. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2022.06.038

Raj, Bhaskar (2022): Hydrogen - PROJECTS: Oman's green fuels megaproject on track. ZAWYA. Online verfügbar unter <https://www.zawya.com/en/projects/industry/omans-green-fuels-megaproject-on-track-p8pbfqj1>, zuletzt geprüft am 11.12.2022

Remmele, Edgar (2022): Vortrag - Antriebssysteme für landwirtschaftliche Maschinen - Klimaschutz und rechtlicher Rahmen für die Kraftstoffnutzung. KTBL Fachgespräch, 09.03.2022

Righi, M.; Hendricks, J.; Sausen, R. (2013): The global impact of the transport sectors on atmospheric aerosol: simulations for year 2000 emissions. In: *Atmos. Chem. Phys.* 13 (19), S. 9939–9970. DOI: 10.5194/acp-13-9939-2013

Röck, M.; Martin, R.; Hausberger, S.; Hanarp, P.; Bersia, C.; Colombano, M. et al. (2020): JEC Tank-to-Wheels Report v5: Heavy duty vehicles. Hg. v. Publications Office of the European Union. Luxembourg (EUR 30271 EN). Online verfügbar unter <https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/handle/JRC117564>, zuletzt geprüft am 12.04.2023

Rönsch, Stefan; Schneider, Jens; Matthischke, Steffi; Schlüter, Michael; Götz, Manuel; Lefebvre, Jonathan et al. (2016): Review on methanation – From fundamentals to current projects. In: *Fuel* (166), S. 276–296. DOI: 10.1016/j.fuel.2015.10.111

RP Photonics (2022): RP-Energie-Lexikon. Hg. v. RP Photonics AG. Online verfügbar unter <https://www.energie-lexikon.info/>

Sacchi, Romain; Terlouw, Tom; Siala, Kais; Dirnaichner, Alois; Bauer, Christian; Cox, Brian et al. (2022): PProspective EnvironMental Impact asSEment (premise): a streamlined approach to producing databases for prospective Life Cycle Assessment using Integrated Assessment Models. In: *Renewable and Sustainable Energy Reviews on February* (1st, 2022). DOI: 10.26434/chemrxiv-2022-hp48d

Samaras, Zissis (2021): Vortrag - LDV Exhaust. AGVES Online Meeting, 08.04.2021

Sandvik (2021): The mine of the future is electric. Sandvik Group. Online verfügbar unter <https://www.home.sandvik/en/stories/articles/2021/09/the-mine-of-the-future-is-electric/>, zuletzt geprüft am 10.12.2022

Sarathy, S. Mani; Oßwald, Patrick; Hansen, Nils; Kohse-Höinghaus, Katharina (2014): Alcohol combustion chemistry. In: *Progress in Energy and Combustion Science* 44, S. 40–102. DOI: 10.1016/j.pecs.2014.04.003



Schemme, Steffen; Samsun, Remzi Can; Peters, Ralf; Stolten, Detlef (2017): Power-to-fuel as a key to sustainable transport systems – An analysis of diesel fuels produced from CO<sub>2</sub> and renewable electricity. In: *Fuel* (205), S. 198–221. DOI: 10.1016/j.fuel.2017.05.061

Schröder, Jörg; Müller-Langer, Franziska; Aakko-Saksa, Päivi; Winther, Kim; Baumgarten, Wibke; Lindgren, Magnus (2020): Methanol as motor fuel: Summary Report. Hg. v. Advanced Motor Fuels Technology Collaboration. Online verfügbar unter [https://www.iea-amf.org/app/webroot/files/file/Annex%20Reports/AMF\\_Annex\\_56.pdf](https://www.iea-amf.org/app/webroot/files/file/Annex%20Reports/AMF_Annex_56.pdf), zuletzt geprüft am 12.04.2023

Schwämmlein, André (2020): Flixbus-Gründer erklärt: Haben E-Fernbusse getestet - es funktioniert nicht. FOCUS Online. Online verfügbar unter [https://www.focus.de/finanzen/boerse/mobilitaetswende-leidet-unter-tunnelblick-verkehrsexperte-probleme-verschwinden-auch-dann-nicht-wenn-man-jeden-benziner-gegen-e-auto-ersetzt\\_id\\_11648494.html](https://www.focus.de/finanzen/boerse/mobilitaetswende-leidet-unter-tunnelblick-verkehrsexperte-probleme-verschwinden-auch-dann-nicht-wenn-man-jeden-benziner-gegen-e-auto-ersetzt_id_11648494.html), zuletzt geprüft am 10.12.2022

Sharpe, Ruth (2021): Morocco outlines plans for new green ammonia project. In: *Argus Media Group*, 2021. Online verfügbar unter <https://www.argusmedia.com/en/news/2235820-morocco-outlines-plans-for-new-green-ammonia-project>, zuletzt geprüft am 16.02.2023

Ship & Bunker (Hg.) (2022a): Global 20 Ports Average (IFO380). Online verfügbar unter <https://shipandbunker.com/prices/av/global/av-g20-global-20-ports-average#IFO380>

Ship & Bunker (Hg.) (2022b): Global 20 Ports Average (VLSFO). Online verfügbar unter <https://shipandbunker.com/prices/av/global/av-g20-global-20-ports-average#VLSFO>

Siemens Energy: Haru Oni: A new age of discovery. Siemens Energy. Online verfügbar unter <https://www.siemens-energy.com/global/en/news/magazine/2021/haru-oni.html>, zuletzt geprüft am 26.07.2022

Skea, Jim; R. Shukla, Priyadarshi; Reisinger, Andy; Slade, Raphael et al. (2022): Climate Change 2022 - Mitigation of Climate Change. Working Group III contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Hg. v. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Online verfügbar unter [https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg3/downloads/report/IPCC\\_AR6\\_WGIII\\_Full\\_Report.pdf](https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg3/downloads/report/IPCC_AR6_WGIII_Full_Report.pdf), zuletzt geprüft am 10.12.2022

SolareKraftstoffe (2021): Kraftstoffpfade, 25.08.2021. Persönliche Kommunikation (Antwort im Fragebogen)

Song, Chonglin; Gong, Guohong; Song, Jinou; Lv, Gang; Cao, Xiaofeng; Liu, Lidong; Pei, Yiqiang (2012): Potential for Reduction of Exhaust Emissions in a Common-Rail Direct-Injection Diesel Engine by Fueling with Fischer–Tropsch Diesel Fuel Synthesized from Coal. In: *Energy & Fuels* (26 [1]), S. 530–535. DOI: 10.1021/ef201378r

Spektrum (2001): Lexikon der Geographie: Erdgas. Spektrum Akademischer Verlag. Online verfügbar unter <https://www.spektrum.de/lexikon/geographie/erdgas/2122>, zuletzt geprüft am 10.12.2022

Statista (2021): Anzahl der Wasserstofftankstellen in Deutschland von 2018 bis 2021. Statista. Online verfügbar unter <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/820836/umfrage/anzahl-der-wasserstofftankstellen-in-deutschland/>, zuletzt geprüft am 30.03.2023

StrFinG (2017): Straßenbaufinanzierungsgesetz. StrFinG, Bundesministerium der Justiz, vom "Vom 28.03.1960, das zuletzt durch Artikel 19 des Gesetzes vom 14.08.2017 (BGBl. I S. 3122) geändert worden ist". Online verfügbar unter <https://www.gesetze-im-internet.de/str-fing/BJNR002010960.html>, zuletzt geprüft am 11.12.2022

Suckow, Oliver (2021): Elektromobilität in behördlichen Flotten – Ein Leitfaden. BMVI. 7. BMVI-Fachkonferenz „Elektromobilität vor Ort“, 09.03.2021. Online verfügbar unter [https://www.now-gmbh.de/wp-content/uploads/2021/03/Fachkonferenz-EM21\\_Elektromobilitaet-in-behoerdlichen-Flotten\\_Suckow-Polizei.pdf](https://www.now-gmbh.de/wp-content/uploads/2021/03/Fachkonferenz-EM21_Elektromobilitaet-in-behoerdlichen-Flotten_Suckow-Polizei.pdf), zuletzt geprüft am 10.12.2022

Sunfire (2021): Erfolgreiche Inbetriebnahme des weltweit größten SOEC-Elektrolyse-Moduls. Sunfire GmbH. Online verfügbar unter <https://www.sunfire.de/de/news/detail/erfolgreiche-inbetriebnahme-des-weltweit-groessten-soec-elektrolyse-moduls>, zuletzt geprüft am 30.03.2023

Tagesschau (2021): CO<sub>2</sub>-Ausstoß von Containerschiffen: Maersk ordert Schiffe mit Methanolantrieb. Norddeutscher Rundfunk. Online verfügbar unter <https://www.tagesschau.de/wirtschaft/unternehmen/maersk-gruener-antrieb-101.html>, zuletzt geprüft am 06.04.2023

Taljegard, Maria; Brynolf, Selma; Grahn, Maria; Andersson, Karin; Johnson, Hannes (2014): Cost-effective choices of marine fuels in a carbon-constrained world: results from a global energy model. In: *Environmental science & technology* (48 [21]), S. 12986–12993. DOI: 10.1021/es5018575

Tarafert (2021): Projects. Tarafert. Online verfügbar unter <https://www.tarafertproject.com/projects>, zuletzt geprüft am 16.02.2023

THW (2009): Umwelterklärung 2009, 2010, 2011 des Ortsverband Celle. Hg. v. Bundesanstalt Technisches Hilfswerk (THW). Online verfügbar unter [https://ov-celle.thw.de/fileadmin/\\_migrated/content\\_uploads/Umwelterklaerung\\_2009.pdf](https://ov-celle.thw.de/fileadmin/_migrated/content_uploads/Umwelterklaerung_2009.pdf)

THW (2021): Umwelterklärung 2021 der Bundesanstalt Technisches Hilfswerk. Hg. v. Bundesanstalt Technisches Hilfswerk (THW). AFZ (Aus- und Fortbildungszentrum) Bonn; Ausbildungszentrum Neuhausen. Online verfügbar unter [https://www.thw-ausbildungszentrum.de/SharedDocs/Downloads/THW-BuS/DE/Ausbildungszentren/Umweltschutz/emas-umwelterklaerung\\_neuhausen.pdf?\\_\\_blob=publicationFile](https://www.thw-ausbildungszentrum.de/SharedDocs/Downloads/THW-BuS/DE/Ausbildungszentren/Umweltschutz/emas-umwelterklaerung_neuhausen.pdf?__blob=publicationFile)

THW (2022): Dienststellen. Bundesanstalt Technisches Hilfswerk (THW). Online verfügbar unter [https://www.thw.de/DE/THW/Bundesanstalt/Dienststellen/dienststellen\\_node.html](https://www.thw.de/DE/THW/Bundesanstalt/Dienststellen/dienststellen_node.html), zuletzt geprüft am 18.04.2023

thyssenkrupp (2022): thyssenkrupp installiert 200 MW Wasserstoffanlage für Shell im Hafen von Rotterdam. thyssenkrupp AG. Online verfügbar unter <https://www.thyssenkrupp.com/de/newsroom/presse-meldungen/presse-detailseite/thyssenkrupp-installiert-200->

mw-wasserstoffanlage-fur-shell-im-hafen-von-rotterdam-125811, zuletzt geprüft am 10.12.2022

Tian, Peng; Wei, Yingxu; Ye, Mao; Liu, Zhongmin (2015): Methanol to Olefins (MTO): From Fundamentals to Commercialization. In: *ACS Catal.* 5 (3), S. 1922–1938. DOI: 10.1021/acscatal.5b00007

Transport & Environment (2022): Leaders for zero emission bus sales in Europe. Twitter. Online verfügbar unter <https://twitter.com/transenv/status/1547547868613017602>

Trialog (2021): ShipFC-Projekt: Hochtemperatur-Brennstoffzelle mit Ammoniak für Schiffe. Trialog Publishers Verlagsgesellschaft. Online verfügbar unter <https://www.internationales-verkehrswesen.de/shipfc-projekt-hochtemperatur-brennstoffzelle-mit-ammoniak-fuer-schiffe/>, zuletzt geprüft am 19.05.2022

U.S. Department of Energy: Alternative Fuels Data Center. Global Ethanol Production by Country or Region. Hg. v. U.S. Department of Energy. Online verfügbar unter <https://afdc.energy.gov/data/10331>, zuletzt geprüft am 30.03.2023

UBA (2022a): Berechnung der Treibhausgasemissionsdaten für das Jahr 2021 gemäß Bundesklimaschutzgesetz. Begleitender Bericht. Hg. v. Umweltbundesamt (UBA). Online verfügbar unter [https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/361/dokumente/220310\\_vjs\\_2021\\_-\\_begleitender\\_bericht\\_-\\_sauber\\_vbs\\_korr\\_kurzfassung.pdf](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

UBA (2022b): Daten der Treibhausgasemissionen des Jahres 2021 nach KSG. Umweltbundesamt (UBA). Online verfügbar unter <https://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/treibhausgas-emissionen>, zuletzt geprüft am 10.12.2022

UBA (2022c): Fahrleistungen, Verkehrsleistung und "Modal Split". Umweltbundesamt (UBA). Online verfügbar unter <https://www.umweltbundesamt.de/daten/verkehr/fahrleistungen-verkehrsaufwand-modal-split#anmerkung>, zuletzt geprüft am 11.12.2022

UBA (2022d): Was ist das Haber-Bosch-Verfahren? Umweltbundesamt (UBA). Online verfügbar unter <https://www.umweltbundesamt.de/umweltatlas/reaktiver-stickstoff/verursacher/energiewirtschaft-industrie/was-ist-das-haber-bosch-verfahren>, zuletzt geprüft am 30.03.2023

UBA (2022e): Kraftstoffverbrauch im Personen- und Güterstraßenverkehr. Umweltbundesamt (UBA). Online verfügbar unter <https://www.umweltbundesamt.de/daten/verkehr/kraftstoffe>, zuletzt geprüft am 26.04.2023

UBA (2022f): Emissionen des Verkehrs - Pkw fahren heute klima- und umweltverträglicher. Umweltbundesamt (UBA). Online verfügbar unter <https://www.umweltbundesamt.de/daten/verkehr/emissionen-des-verkehrs#pkw-fahren-heute-klima-und-umweltvertraglicher>, zuletzt geprüft am 26.04.2023

UBA (2023): Erneuerbare Energien im Verkehrssektor. Umweltbundesamt (UBA). Online verfügbar unter <https://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/erneuerbare-energien/erneuerbare-energien-in-zahlen#verkehr>, zuletzt geprüft am 26.04.2023

UBE: Dimethyl carbonate (DMC). UBE Corporation. Online verfügbar unter [https://www.ube.com/contents/en/chemical/fine/dimethyl\\_carbonate.html](https://www.ube.com/contents/en/chemical/fine/dimethyl_carbonate.html), zuletzt geprüft am 30.03.2023

Ueckerdt, F.; Pfluger, B.; Odenweiler, A.; Günther, C.; Knodt, M.; Kemmerzell, J. et al. (2021a): Durchstarten trotz Unsicherheiten: Eckpunkte einer anpassungsfähigen Wasserstoffstrategie. Wie die Politik Wasserstoffpfade hin zur Klimaneutralität 2045 finden kann. Hg. v. Ariadne und Kopernikus-Projekt. Online verfügbar unter <https://ariadneprojekt.de/>, zuletzt geprüft am 11.12.2022

Ueckerdt, Falko; Bauer, Christian; Dirnaichner, Alois; Everall, Jordan; Sacchi, Romain; Luderer, Gunnar (2021b): Potential and risks of hydrogen-based e-fuels in climate change mitigation. In: *Nature Climate Change* (11), S. 384–393

Uherek, Elmar; Halenka, Tomas; Borken-Kleefeld, Jens; Balkanski, Yves; Berntsen, Terje; Borrego, Carlos et al. (2010): Transport impacts on atmosphere and climate: Land transport. In: *Atmospheric environment (Oxford, England : 1994)* 44 (37), S. 4772–4816. DOI: 10.1016/j.atmosenv.2010.01.002

UN (2022a): Climate Change - Goal 13: Take urgent action to combat climate change and its impacts. United Nations (UN). Online verfügbar unter <https://www.un.org/sustainabledevelopment/climate-change/>, zuletzt geprüft am 11.12.2022

UN (2022b): THE 17 GOALS | Sustainable Development. United Nations (UN) Department of Economic and Social Affairs. Online verfügbar unter <https://sdgs.un.org/goals>, zuletzt geprüft am 11.12.2022

UN (2022c): The-Sustainable-Development-Goals-Report-2022. Hg. v. United Nations (UN). Online verfügbar unter <https://unstats.un.org/sdgs/report/2022/The-Sustainable-Development-Goals-Report-2022.pdf>, zuletzt geprüft am 13.12.2022

UNdata (2022a): Kerosene-type Jet Fuel. Online verfügbar unter <http://data.un.org/Data.aspx?q=jet+fuel&d=EDATA&f=cmID%3aJF>, zuletzt geprüft am 30.03.2023

UNdata (2022b): Motor Gasoline. Online verfügbar unter <http://data.un.org/Data.aspx?q=gasoline&d=EDATA&f=cmID%3aMO>, zuletzt geprüft am 30.03.2023

UNdata (2022c): Paraffin waxes. Online verfügbar unter <http://data.un.org/Data.aspx?d=EDATA&f=cmID%3APW#EDATA>, zuletzt geprüft am 30.03.2023

Universität Hamburg (2021): H2POLITICS : Political Science, esp. Globalisation and Climate Governance. Universität Hamburg. Online verfügbar unter <https://www.wiso.uni-hamburg.de/en/fachbereich-sowi/professuren/mueller/forschung/h2politics.html>, zuletzt geprüft am 12.12.2022

- van Nispen tot Pannerden, Frans (2011): International encyclopedia of political science. Policy Instruments. Thousand Oaks, Calif.: SAGE Publications. Online verfügbar unter <https://repub.eur.nl/pub/33101>
- Van-Dal, Éverton Simões; Bouallou, Chakib (2013): Design and simulation of a methanol production plant from CO<sub>2</sub> hydrogenation. In: *Journal of Cleaner Production* (57), S. 38–45. DOI: 10.1016/j.jclepro.2013.06.008
- Viridis (2022): Fleet Technology. Viridis Bulk Carriers AS. Online verfügbar unter <https://www.viridiskarriers.no/fleet-technology>, zuletzt geprüft am 19.05.2022
- Voigt, Christiane; Kleine, Jonas; Sauer, Daniel; Moore, Richard H.; Bräuer, Tiziana; Le Clercq, Patrick et al. (2021): Cleaner burning aviation fuels can reduce contrail cloudiness. In: *Commun Earth Environ* (2 [1]). DOI: 10.1038/s43247-021-00174-y
- Volkswagen (2021): Signifikante CO<sub>2</sub>-Einsparungen möglich: Neueste Dieselmotoren für Kraftstoffe aus Rest- und Recyclingstoffen freigegeben. Hg. v. Volkswagen. Online verfügbar unter <https://www.volkswagen-newsroom.com/de/pressemitteilungen/signifikante-co2-einsparungen-moeglich-neueste-dieselmotoren-fuer-kraftstoffe-aus-rest-und-recyclingstoffen-freigegeben-7691/download>, zuletzt geprüft am 10.12.2022
- Wasserstoffrat (2021): Wasserstoff Aktionsplan Deutschland 2021-2025. Hg. v. Nationaler Wasserstoffrat. Online verfügbar unter [https://www.wasserstoffrat.de/fileadmin/wasserstoffrat/media/Dokumente/2021-07-02\\_NWR-Wasserstoff-Aktionsplan.pdf](https://www.wasserstoffrat.de/fileadmin/wasserstoffrat/media/Dokumente/2021-07-02_NWR-Wasserstoff-Aktionsplan.pdf)
- Weizsäcker, E. U. (1989): Erdpolitik – ökologische Realpolitik an der Schwelle zum Jahrhundert der Umwelt. Darmstadt: Wissenschaftliche Buchgesellschaft
- Wernet, Gregor; Bauer, Christian; Steubing, Bernhard; Reinhard, Jürgen; Moreno-Ruiz, Emilia; Weidema, Bo (2016): The ecoinvent database version 3 (part I): overview and methodology. In: *Int J Life Cycle Assess* (21 [9]), S. 1218–1230. DOI: 10.1007/s11367-016-1087-8
- Wieler, Jochen (2022): Elektroautos im Test: So hoch ist die Reichweite wirklich. Hg. v. ADAC. Online verfügbar unter <https://www.adac.de/rund-ums-fahrzeug/tests/elektromobilitaet/stromverbrauch-elektroautos-adac-test/>, zuletzt geprüft am 30.03.2023
- Wiese, Frauke; Thema, Johannes; Cordroch, Luisa (2022): Strategies for climate neutrality. Lessons from a meta-analysis of German energy scenarios. In: *Renewable and Sustainable Energy Transition* (2)
- Wietschel, Martin; Link, Steffen; Biemann, Kirsten; Helms, Hinrich (2022): Langfristige Umweltbilanz und Zukunftspotenzial alternativer Antriebstechnologien. Studie zum deutschen Innovationssystem | Nr. 9-2022. Unter Mitarbeit von Fraunhofer ISI und Institut für Energie- und Umweltforschung (ifeu). Hg. v. Expertenkommission Forschung und Innovation (EFI). Online verfügbar unter [https://www.e-fi.de/fileadmin/Assets/Studien/2022/StuDIS\\_09\\_2022.pdf](https://www.e-fi.de/fileadmin/Assets/Studien/2022/StuDIS_09_2022.pdf), zuletzt geprüft am 11.12.2022
- World Bank (2022): Access to electricity (% of population). Data. The World Bank. Online verfügbar unter <https://data.worldbank.org/indicator/EG.ELC.ACCS.ZS>, zuletzt geprüft am 13.12.2022

Wouters, Christian; Lehrheuer, Bastian; Heuser, Benedikt; Pischinger, Stefan (2020): Ottomischkraftstoffe mit Methanol, Ethanol und Butanol. In: *MTZ Motortech Z* (81 [3]), S. 16–23. DOI: 10.1007/s35146-019-0193-0

Wyatt, David (2022): Elektrische Baumaschinen entscheidend für umweltfreundlicheres Bauen. IDTechEx. Online verfügbar unter <https://www.idtechex.com/de/research-article/elektrische-baumaschinen-entscheidend-f-r-umweltfreundlicheres-bauen/26187>, zuletzt geprüft am 10.12.2022

Yoo, Byeong-Yong (2017): Economic assessment of liquefied natural gas (LNG) as a marine fuel for CO<sub>2</sub> carriers compared to marine gas oil (MGO). In: *Energy* (121), S. 772–780. DOI: 10.1016/j.energy.2017.01.061