



NRL

Norddeutsches
RealLabor

Potentiale, Grenzen und Prioritäten

Grüner Wasserstoff für die Energiewende

Teil 3: Wasserstoffanwendung im Verkehrssektor

Hamburg, Mai 2023

Jonas Bannert, Prof. Dr. Jens-Eric von Düsterlho, Britta Heybrock

Grüner Wasserstoff für die Energiewende

Potentiale, Grenzen und Prioritäten – Teil 3: Wasserstoffanwendung im Verkehrssektor

Mai 2023

[Jonas Bannert, Prof. Dr. Jens-Eric von Düsterlho, Britta Heybrock](#)

Über die Autor*innen

In der Arbeitsgruppe „Neue Markt- & Geschäftsmodelle, Regulatorik“ des Norddeutschen Reallabors (NRL) werden an der HAW Hamburg die Praxisprojekte der Arbeitsgruppe „Wärme & Quartiere“ aus ökonomischer Perspektive wissenschaftlich

Zusammenfassung

Grüner Wasserstoff ist im straßenbasierten Verkehrssektor eine Option für die Antriebswende. Dabei treffen die unter Druck vorteilhafte gravimetrische und volumetrische Dichte sowie vereinfachte Betankungen von Wasserstoff-Fahrzeugen im Vergleich zu Batterie-Fahrzeugen auf Energieeffizienz-Nachteile sowie aktuell geringere Marktreife und höheren Anschaffungs- und Betriebskosten. So ist Strom im Gegensatz zur Wassererstoff mittlerweile in den Energiekosten konkurrenzfähig zu den fossilen Kraftstoffen. Das umweltökonomische Instrument der THG-Minderungsquote kann perspektivisch Konkurrenzfähigkeit für grünen Wasserstoff im Verkehrssektor gegenüber fossilen Kraftstoffen ermöglichen. Diese Teilstudie kommt zu dem Schluss, dass statt einer allgemeinen Technologieoffenheit im Verkehrssektor sich die Forschung und der potenzielle Einsatz von Wasserstoff im Verkehrssektor insbesondere auf die (Nutzfahrzeug-)Anwendungsbereiche konzentrieren sollte, in denen die vorteilhaften Eigenschaften von Wasserstoff-Fahrzeugen auch einen entscheidenden ökonomischen Vorteil gegenüber Batterie-Fahrzeugen haben. Insgesamt wird grüner Wasserstoff im straßenbasierten Verkehrssektor im Vergleich zur direkten Nutzung von grünem Strom eine eher untergeordnete Rolle spielen.

Keywords

Grüner Wasserstoff, Markt der Zukunft, Verkehrssektor, Technologievergleich, BEV, FCEV, ICEV, Brennstoffzelle, Batterie, Oberleitung, E-Fuels, synthetische Kraftstoffe, THG-Minderungsquote, Norddeutsches Reallabor

Inhaltsverzeichnis

1.	EINLEITUNG	1
1.1	HERAUSFORDERUNG: KLIMANEUTRALITÄT 2045	1
1.2	DAS VERBUNDFORSCHUNGSPROJEKT NORDDEUTSCHES REALLABOR (NRL).....	2
1.3	ZIELSETZUNG UND AUFBAU.....	3
2.	ERNEUERBARE ENERGIEN IM VERKEHRSEKTOR.....	4
3.	TECHNOLOGIEN DER ANTRIEBSWENDE	6
3.1	BATTERIEELEKTRISCHES FAHRZEUG (BATTERIE ^{FZ}).....	7
3.2	BRENNSTOFFZELLENELEKTRISCHES FAHRZEUG (BRENNSTOFFZELLEN ^{FZ})	10
3.4	VERBRENNUNGSMOTOR-FAHRZEUG (E-FUELS ^{FZ})	14
3.5	OBERLEITUNGS-FAHRZEUG (OBERLEITUNG ^{FZ})	17
4.	WIRTSCHAFTLICHKEIT UND MARKTENTWICKLUNG	19
4.1	POLITISCHE RAHMENBEDINGUNGEN	19
4.2	ÖKONOMISCHE RAHMENBEDINGUNGEN DER ANTRIEBSWENDE.....	20
4.2.1	<i>Anschaffungs- und Betriebskosten der Antriebswende.....</i>	<i>20</i>
4.2.2	<i>Umweltökonomische Instrumente im Verkehrssektor</i>	<i>25</i>
4.2.3	<i>Schwerpunkt THG-Minderungsquote</i>	<i>32</i>
4.3	MARKTHOCHLAUF UND GESCHÄFTSMODELLE	36
5.	NRL.....	40
5.1	POTENTIAL IN DER NRL-MODELLREGION	40
5.2	NRL-PROJEKTE	41
5.3	KURZ-INTERVIEW NRL AG 7 „MOBILITÄT“-LEITUNG	42
5.4	ANWENDUNGSBEISPIEL ABFALLSAMMELFAHRZEUG	43
6.	FAZIT: GRÜNER WASSERSTOFF IM VERKEHRSEKTOR	46
I.	TABELLENVERZEICHNIS	I
II.	ABBILDUNGSVERZEICHNIS	I
III.	ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS.....	II
IV.	LITERATURVERZEICHNIS	IV
V.	ANHANG	XVIII

Vorbemerkung

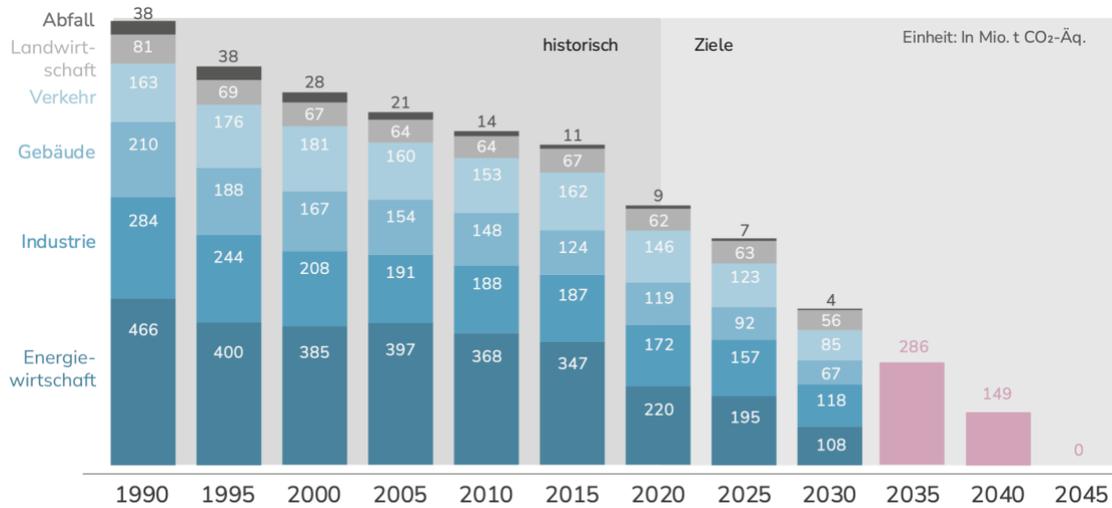
Die Studienreihe „Grüner Wasserstoff für die Energiewende – Potentiale, Grenzen und Prioritäten“ soll einen Überblick entlang der Wertschöpfungskette von grünem Wasserstoff und damit von der Wasserstoffherzeugung bis hin zur Anwendung in den verschiedenen Verbrauchssektoren geben.

Durch techno-ökonomische Betrachtungen werden verschiedene relevante Technologien im Hinblick auf ihre Potentiale und Grenzen bewertet und daraus Prioritäten für den zukünftigen Einsatz von grünem Wasserstoff abgeleitet. Dafür werden die „Potentiale, Grenzen und Prioritäten“ aufbauend auf den Arbeitsgruppen des NRL und deren Referenzprojekten in folgenden Themenbereichen untersucht und sukzessive veröffentlicht:

- Studienreihe Teil 1: Grüner Wasserstoff als Markt der Zukunft
- Studienreihe Teil 2: Wasserstoffanwendung im Gebäudesektor
- **Studienreihe Teil 3: Wasserstoffanwendung im Verkehrssektor**
- Studienreihe Teil 4: Wasserstoffanwendung im Industriesektor
- Studienreihe Teil 5: Wasserstoff Erzeugung
- Studienreihe Teil 6: Wasserstoffanwendungen im Sektoren-Vergleich

1. Einleitung

1.1 Herausforderung: Klimaneutralität 2045



Quelle: Umweltbundesamt (2022); Daten der Treibhausgasemissionen des Jahres 2021 nach KSG

Abbildung 1: Treibhausgasemissionen der einzelnen Sektoren seit 1990 mit Zielen bis 2045

Die Bundesrepublik Deutschland hat mit dem 2021 nachgebesserten Bundes-Klimaschutzgesetz (KSG) beschlossen, bis 2045 Klimaneutralität zu erreichen. Dafür müssen neben der Energiewirtschaft auch die Verbrauchssektoren Industrie, Verkehr und Gebäude vollständig treibhausgasneutral werden, was eine enorme Herausforderung darstellt.

Abbildung 1 zeigt, dass der Weg zur vollständigen Treibhausneutralität anspruchsvoll ist. Seit dem Referenzjahr 1990 konnten in 30 Jahren bis 2020 die Emission von Treibhausgasen (THG) zwar um 40 % reduziert werden, das entspricht durchschnittlich 17 Mio. t CO₂-Äq. pro Jahr¹ (dunkelgrauer Bereich). In den nächsten 25 Jahren von 2020 bis 2045 müssen die THG-Emissionen aber um die restlichen 60 % gesenkt werden, das entspricht durchschnittlich 30 Mio. t CO₂-Äq. pro Jahr² (hellgrauer Bereich). Die jährliche THG-Minderung muss zukünftig also deutlich

ambitionierter ausfallen als in den letzten 30 Jahren, um das Ziel der Klimaneutralität 2045 erreichen zu können. Es gilt, sämtliche dafür notwendige Technologien zügig in die breite Anwendung zu führen.

Mit der „Nationalen Wasserstoffstrategie“ hat die Bundesregierung der Bundesrepublik Deutschland im Sommer 2020 die Bedeutung von **grünem Wasserstoff** (= aus erneuerbaren Energien gewonnen) einen zentralen Baustein für die erfolgreiche Energiewende unterstrichen (BMWi 2020). Die Herstellung und Anwendung von grünem Wasserstoff und deren Technologie als „Markt der Zukunft“ unterliegen derzeit noch vielfältigen technischen und wirtschaftlichen Herausforderungen. Die vorliegende Studienreihe „**Grüner Wasserstoff für die Energiewende – Potentiale, Grenzen und Prioritäten**“ widmet sich diesen Themen und präsentiert eine Einordnung im Rahmen des

¹ 40 % / 30 Jahre = 1,33 % pro Jahr → 1,33 % von THG-Emissionen₁₉₉₀ = 1.242 Mio. t CO₂-Äq. * 1,33 % = 17 Mio. t CO₂-Äq.
² 60 % / 25 Jahre = 2,40 % pro Jahr → 2,40 % von THG-Emissionen₁₉₉₀ = 1.242 Mio. t CO₂-Äq. * 2,40 % = 30 Mio. t CO₂-Äq.

Verbundforschungsprojektes
„Norddeutsches Reallabor“ (NRL).

1.2 Das Verbundforschungsprojekt Norddeutsches Reallabor (NRL)

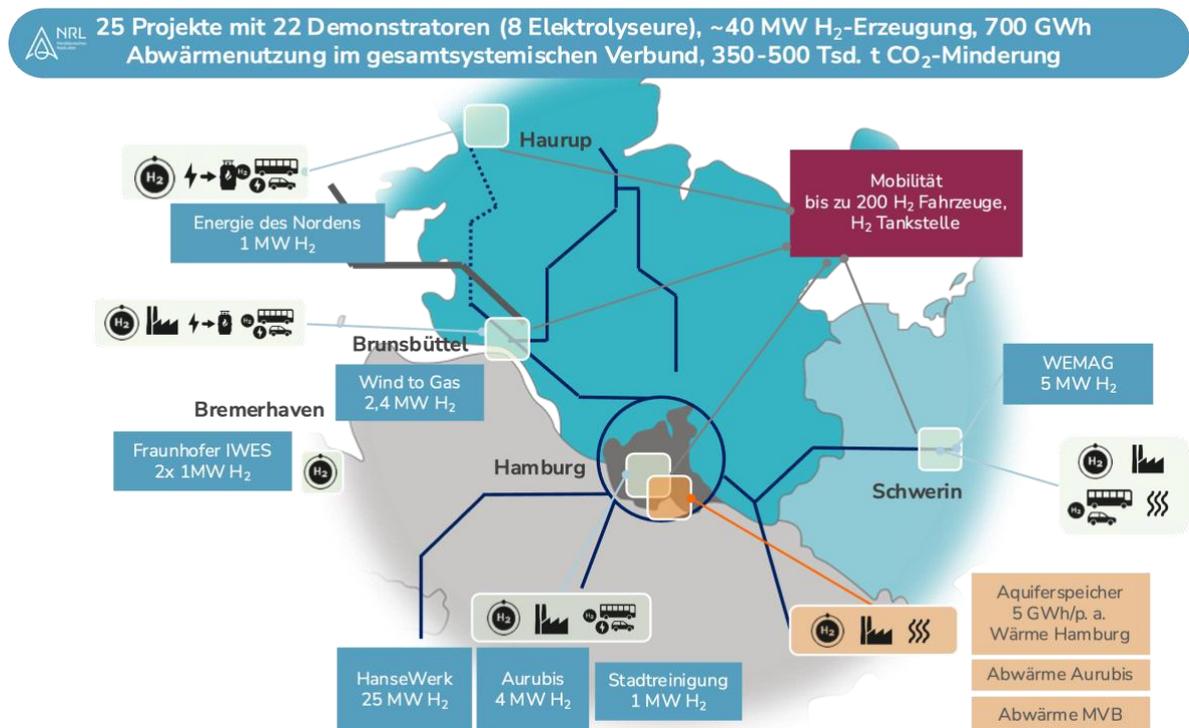


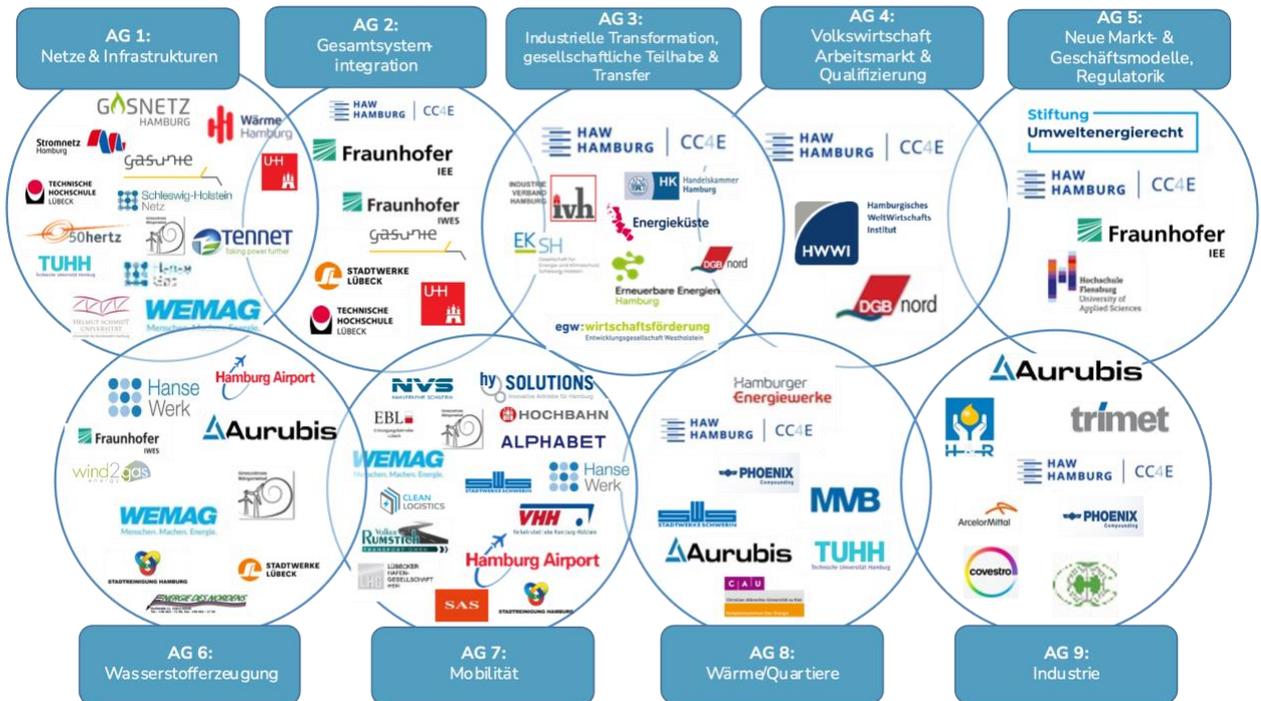
Abbildung 2: NRL-Struktur

Das Verbundforschungsprojekt NRL „Norddeutsches Reallabor“³³ (2021 bis 2026) ist ein im Rahmen des 7. Energieforschungsprogramms mit dem Förderschwerpunkt „Reallabore der Energiewende“ mit rund 52 Millionen € gefördertes Projekt. Ziel des NRL ist es, die Transformation des Energiesystems zu erproben und so den Weg zu einer schnellen Defossilisierung aller Verbrauchssektoren zu demonstrieren. Dabei werden die Erzeugungsregionen von grünem Strom Schleswig-Holstein und Mecklenburg-Vorpommern mit der Verbrauchsregion Hamburg gekoppelt. Dabei wird die Wasserstoff-Wertschöpfungskette abgedeckt von der Bereitstellung über den Transport und die Speicherung bis zur Umwandlung von

Energie in der Industrie, der Wärmeversorgung und dem Mobilitätssektor. Diese Vielfalt ermöglicht eine integrierte Betrachtung des Energiesystems und dessen Erzeugungs- und Verbrauchssektoren im NRL.

Konkret arbeiten im NRL 23 Förderpartner, 30 assoziierte Partner sowie 6 Behörden und Ministerien der beteiligten Landesregierungen zusammen. Dabei entstehen in den nächsten Jahren 22 Referenzanlagen wie beispielsweise acht Elektrolyseure mit einer Wasserstoff-Erzeugungskapazität von bis zu 42 MW, bis zu 200 wasserstoffbetriebene Fahrzeuge verschiedener Klassen in unterschiedlichen Nutzungsszenarien und drei Projekte zur

³³ Weitere Informationen und Publikationen aus dem NRL finden Sie unter www.norddeutsches-reallabor.de.



Abwärmenutzung in einem Umfang von 700 GWh pro Jahr (siehe Abbildung 2 und Abbildung 3). Mit den geplanten Vorhaben

des Norddeutschen Reallabors können etwa 350-500.000 Tonnen CO₂-Emissionen pro Jahr eingespart werden.

1.3 Zielsetzung und Aufbau

Abbildung 3: NRL-Projektpartner

Im Teil 1: „Grüner Wasserstoff als Markt der Zukunft“ der Studienreihe Grüner Wasserstoff für die Energiewende – Potentiale, Grenzen und Prioritäten“ wurde eine Einführung in die Rolle von grünem Wasserstoff als Markt der Zukunft gegeben. Darauf bauen die weiteren Teile zur Wasserstoff-Anwendung und Erzeugung auf.

In diesem Teil 3: Wasserstoffanwendung im Verkehrssektor wird die Rolle von Wasserstofftechnologien im Vergleich zu den weiteren alternativen Antriebsmöglichkeiten der straßenbasierten Mobilität eingeordnet und bewertet.

Dazu wird in Kapitel 2 zunächst der aktuelle Stand THG-Emission-Reduzierung im Verkehrssektor aufgeführt. In Kapitel 3 werden dann relevanten Technologien zur

THG-Emission-Reduzierung dargestellt. Anschließend werden in Kapitel 4 diese Technologien vor dem Hintergrund des Markthochlaufs von Wasserstoff ökonomisch bewertet. In Kapitel 5 wird darauf eingegangen, welche Rolle diese Technologien für das NRL und die NRL-Modellregion spielen. Abschließend werden in Kapitel 6 auf Grundlage der erarbeiteten Erkenntnisse dieser Studie die Potentiale, Grenzen und Prioritäten von Wasserstofftechnologie in dem Verkehrssektor bewertet.

Grundlage für diese Teilstudie sind Literaturrecherche, Experteninterviews mit Praxispartnern aus der NRL-Modellregion und darüber hinaus sowie eigene Modellierungen.

2. Erneuerbare Energien im Verkehrssektor

Anteil Erneuerbare Energien in den Sektoren Strom, Wärme und Verkehr von 2000 bis 2022 (in %)

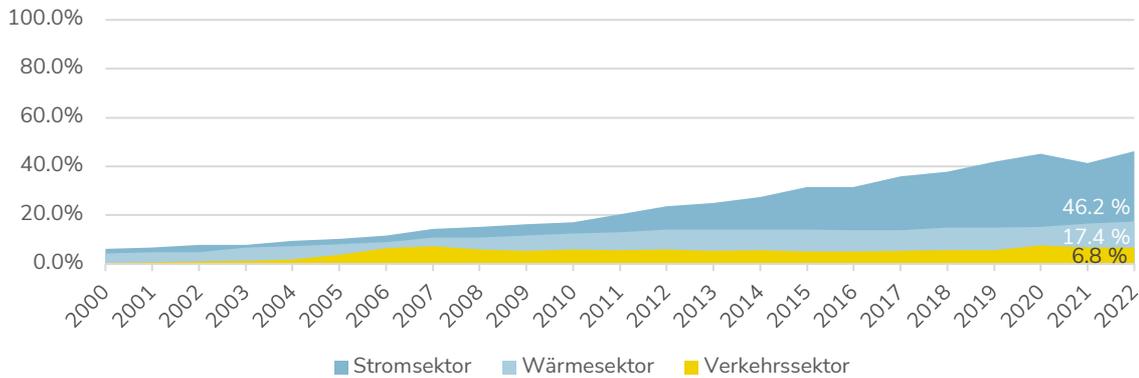


Abbildung 4: Entwicklung Anteil Erneuerbarer Energien in den verschiedenen Sektoren von 2000 bis 2022⁴

Im Verkehrssektor wurden 2023 auf nationaler Ebene rund 148 Mio. t CO₂-Äq ausgestoßen (UBA 2023b: 13). Das entspricht rund 20 % der nationalen Treibhausgasemissionen (siehe Abbildung 1). Die Treibhausgasemissionen im Verkehrssektor entstehen in Deutschland zu rund 97 % im Straßenverkehr, die restlichen 3 % entfallen auf den nationalen Schienen-, Schiffs- und Flugverkehr (UBA 2022b).⁵

Laut dem nationalen Klimaschutzgesetz (KSG) sollen im Verkehrssektor die Treibhausgasemissionen von 2020 um 65 Mio. t CO₂-Äq bzw. rund 55 % auf 85 Mio. t CO₂-Äq und bis 2045 auf null bzw. Netto-Treibhausgasneutralität gesenkt werden. 2022 war der Verkehrssektor der einzige Sektor, in dem das sektorspezifische THG-Minderungsziel verfehlt wurde und ein Emissionsanstieg verzeichnet wurde (UBA 2023b). Insgesamt sind die THG-Emissionen

im Verkehrssektor im Vergleich zu den anderen Sektoren seit 1990 mit damals 163 Mio. t CO₂-Äq bis 2023 nur marginal um rund 15 Mio. t CO₂-Äq gesunken (UBA 2022b, 2023b: 13). Dies liegt insbesondere daran, dass die Effizienzgewinne durch die stetig wachsende Verkehrsleistung (KBA 2022b) und höhere Motorisierungen wieder aufgezehrt worden sind (SRU 2021: 57).⁶ Um die Treibhausgasemissionen im Verkehrssektor zu senken, wurde in der Vergangenheit die Effizienz der Motoren gesteigert und erneuerbare Energien in Form von *Biodiesel* (2020: 30 TWh, entspricht rund zwei Drittel des erneuerbaren-Energie-Anteils im Verkehrssektor), *Bioethanol* (2020: 8 TWh) und grünem Strom (2020: 5 TWh) dem fossilen Kraftstoff beigemischt und dadurch substituiert (UBA 2021). Die Beimischung von Biokraftstoffen ist dabei aufgrund ihrer potenziellen

⁴ Grundlage ist (BMWK & AGEE-Stat 2022, 2023).

⁵ Auf europäischer Ebene ist der Anteil an den THG-Emissionen im Straßenverkehrs mit 71,7 % geringer, dort haben insbesondere Schiffsverkehr mit 14,1 % und Flugverkehr mit 13,4 % einen größeren Anteil (EEA 2022: 17).

⁶ Ein Beispiel für einen solchen Effizienz-Rebound-Effekt: Der klassische VW Käfer aus dem Jahr 1955 hat 7,5 l/100 km verbraucht, der moderne VW Beetle aus dem Jahr 2005 mit rund 7,1 l/100 km in etwa dasselbe. Die Effizienzgewinn durch technologischen Fortschritt sind in der Steigerung der Leistungsfähigkeit des Motors (von 30 PS auf 75 PS), der Steigerung der Spitzengeschwindigkeit (von 110 km/h auf 160 km/h) und der Erhöhung des Fahrzeuggewichts (von 730 kg auf 1200 kg) zu finden – aber nicht in der Senkung des tatsächlichen Kraftstoffverbrauchs (Santarius 2012: 12).

Nutzungskonkurrenz mit der Nahrungs- und Futtermittelproduktion und dem Naturschutz an ihre gesellschaftlich-akzeptierten Grenzen gestoßen.⁷ Zudem kann die Beimischung nur ein erster Schritt in Richtung Defossilisierung sein, da immer noch signifikante Mengen an fossilem THG ausgestoßen werden.⁸ Insgesamt stagniert der Anteil der erneuerbaren Energien im Verkehrssektor seit Mitte der 2000er bei rund 5 bis 7 % (siehe Abbildung 4).

Um die THG-Emissionen im Verkehrssektor weiter zu reduzieren, gibt es im Rahmen der Verkehrswende eine Hierarchie an Lösungsstrategien, die es für eine ganzheitliche Verkehrswende in dieser Reihenfolge auch zu kombinieren gilt (Schneidewind 2019: 225–227; SRU 2017: 77; UBA 2019: 191; Wuppertal Institut 2020: 74–88):

- *Mobilitätswende*: Verringerung des Verkehrsaufkommens (weniger Personen- und Tonnenkilometer durch bspw. kompakte, multizentrische Städte und Konsolidierung des Güterverkehrs),

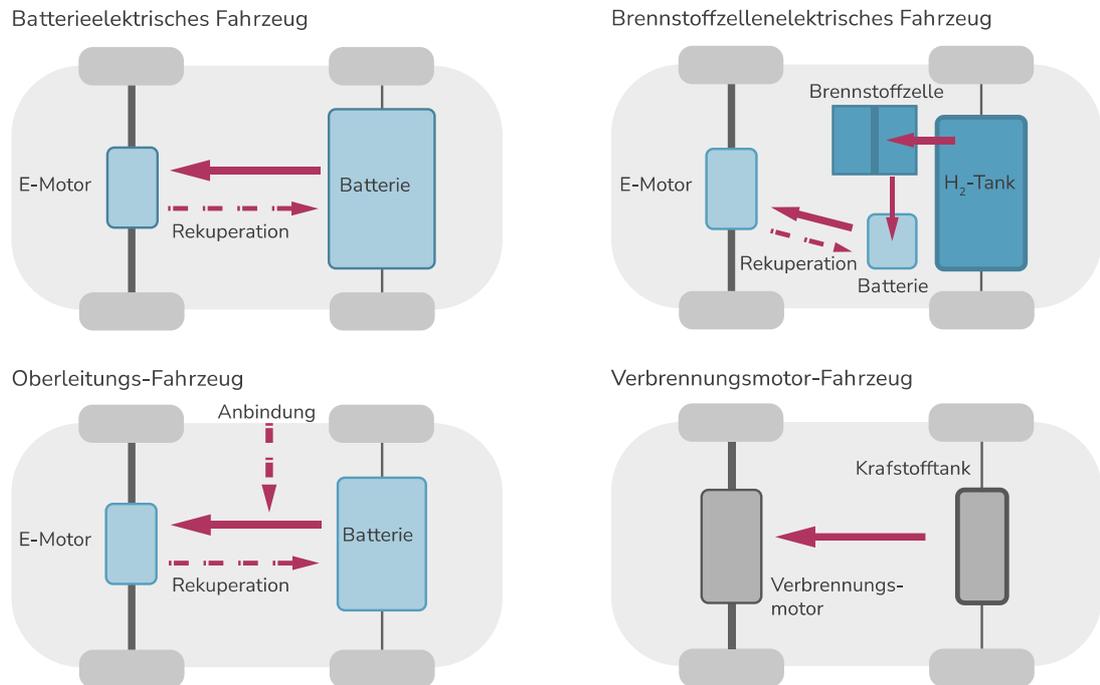
- *Verkehrsträgerwende*: Verlagerung auf möglichst energieeffiziente und klimafreundliche Verkehrsmittel (höherer Anteil von Verkehrsträgern mit geringerem Energiebedarf pro Tonne- /Personenkilometer, indem bspw. ÖPNV, Zug sowie Fuß- und Radverkehr den PKW-, LKW- und Flugverkehr ersetzen und Fahrzeuge optimiert ausgelastet werden),
- *Antriebswende*: Verbesserung der Effizienz von Fahrzeugen und Verkehrssystemen durch Vermeidung der THG-Emissionen pro Energieeinheit durch die Ersetzung der fossilen Kraftstoffe durch bspw. Elektrizität, Wasserstoff und synthetische Kraftstoffe.

Entsprechend des NRL-Fokus auf die effiziente Nutzung alternativer Antriebe im Verkehrssektor konzentriert sich diese Studie im Folgenden insbesondere auf die unterste Lösungsstrategie, die *Antriebswende* und damit auf die Substitution fossiler Kraftstoffe mit Hilfe erneuerbarer Energien. Dabei wird insbesondere der Straßenverkehr als größter THG-Emittent im Verkehrssektor betrachtet, auf andere Verkehrsträger wird nur am Rande exemplarisch eingegangen.

⁷ Als Reaktion auf die Kontroverse um Biokraftstoffe, wurden in der Erneuerbare-Energien-Richtlinie der EU (RED II) *fortschrittliche Biokraftstoffe* definiert (Positivliste auf Basis von biogenen Abfall- und Reststoffen) und gefördert (EU-Richtlinie zur Förderung der Nutzung von Energie aus erneuerbaren Quellen 2018, Anhang IX).

⁸ Treibhausgasemissionen ausgewählter Kraftstoffe (Well-to-Wheel Betrachtung): Benzin = 2,88 kg CO₂-Äq / l; Benzin E5 = 2,80 kg CO₂-Äq / l; Benzin E10 = 2,72 kg CO₂-Äq / l; Diesel = 3,24 kg CO₂-Äq / l; Diesel D7 = 3,15 kg CO₂-Äq / l; Biodiesel = 1,92 kg CO₂-Äq / l (BMVI 2014: 26; DIN EN 16258:2013-03 o.J.).

3. Technologien der Antriebswende



Eigene Darstellung basierend auf VDI & VDE (2022): Klimafreundliche Nutzfahrzeuge

Abbildung 5: Schematischer Aufbau der verschiedenen Antriebstechnologien Batterie^{FZ}, Brennstoffzellen^{FZ}, E-Fuels^{FZ} und Oberleitung^{FZ}

Antriebswende bedeutet, den klassischen Verbrennungsmotor-Antrieb (Fossile^{FZ}), welcher durch die Verbrennung von fossilen Kraftstoffen THG emittiert, durch eine treibhausgasneutrale Antriebstechnologie zu ersetzen. Dafür kommen grundsätzlich vier alternative Technologie-Ansätze in Frage (siehe

Abbildung 5), die auch in Hybridformen miteinander kombiniert werden können:

- Rein **Batterieelektrisches Fahrzeug** (Batterie^{FZ}) mit dem Energieträger grüner Strom. Dabei wird das Fahrzeug direkt mit Strom aus einer Batterie mit einem Elektromotor angetrieben.
- **Brennstoffzellenelektrisches Fahrzeug** (Brennstoffzellen^{FZ}) mit dem Energieträger grüner Wasserstoff. Dabei wird grüner

Wasserstoff in der Brennstoffzelle in Strom umgewandelt und das Fahrzeug mit einem Elektromotor angetrieben.

- **Verbrennungsmotor-Fahrzeug**, dass ausschließlich **klimaneutrale, synthetische Kraftstoffe auf grüner Wasserstoff-Basis** (E-Fuels^{FZ}) nutzt. Dabei wird das Fahrzeug durch die Verbrennung der synthetischen Kraftstoffe in einem Verbrennungsmotor angetrieben.
- **Oberleitungs-Fahrzeug** (Oberleitung^{FZ}) mit dem Energieträger grüner Strom. Dabei wird das Fahrzeug direkt mit Strom aus einer Oberleitung mit einem Elektromotor angetrieben. Dieser Antrieb muss mit einem weiteren

Antriebstyp auf nicht elektrifizierten Strecken kombiniert werden.

3.1 Batterieelektrisches Fahrzeug (Batterie^{FZ})

Wirkungsgrad Gesamt	~ 77 %
Wirkungsgrad Energiebereitstellung	~ 100 %
Wirkungsgrad Antrieb	~ 77 %
Gravimetrische Dichte	0,1 bis 0,2 kWh/kg (Lithium-Batterie)
Volumetrische Dichte	0,25 bis 0,67 kWh/dm ³ (Lithium-Batterie)
Vorteile	<ul style="list-style-type: none"> • Hoher Wirkungsgrad • Rekuperation möglich • Vergleichsweise einfacher Antriebsstrang → geringerer Wartungsaufwand im Vergleich zu Fossilem^{FZ} • Systemdienliche Nutzung der Batterien möglich
Nachteile	<ul style="list-style-type: none"> • Vergleichsweise geringe gravimetrische/volumetrische Dichte • Ladezeiten vergleichsweise lang • Einsatz konfliktärer Rohstoffe (insbesondere Kobalt, Nickel und Lithium) – könnte durch neue Batterietechnologien reduziert oder vermieden werden • Aufbau neuer Ladeinfrastruktur nötig

Ein rein mit einer Batterie angetriebenes Fahrzeug (Batterie^{FZ}) kann in der Nutzung als treibhausgasneutral bezeichnet werden, wenn es ausschließlich grünen Strom nutzt.

Ein Batterie^{FZ} ist im Vergleich zu den anderen alternativen Antriebsmöglichkeiten mit einem energetischen Gesamtwirkungsgrad von ~ 77 % am effizientesten (siehe Abbildung 6)⁹. Der grüne Strom kann als Energie direkt genutzt werden und die Ladung und Speicherung in der Batterie (Wirkungsgrad ~ 90 %) sowie der Antrieb mit einem Elektromotor (Wirkungsgrad ~ 85 %) sind effizient. Der Wirkungsgrad eines Batterie^{FZ} kann zudem durch die

Nutzung von Rekuperation (Energie-Rückgewinnung im Bremsvorgang) weiter verbessert werden.

Die Herstellung eines Batterie^{FZ} ist insbesondere durch die Batterieherstellung energieintensiv und löst damit aktuell in der Herstellung insbesondere durch den weltweiten noch sehr hohen Anteil an fossiler Energie in der Stromproduktion mehr THG-Emissionen aus als ein Fossiles^{FZ}. Gleichzeitig sind über den gesamten Lebenszyklus bei einem Batterie^{FZ}-PKW die THG-Emissionen schon beim aktuellen nationalen Strommix geringer als bei einem Fossilen^{FZ}-PKW. Wird zukünftig auch in der Herstellung

⁹ (SRU 2021: 58). In der Literatur werden leicht abweichende Wirkungsgrade angenommen, bspw. 69 % (acatech, Leopoldina & Akademienunion 2017: 31), 57-63 % (VDI & VDE 2022: 17) oder für ein Batterie^{FZ}-LKW 73 % (Öko-Institut & HHN 2020: 44) und 80 % (Fraunhofer ISI 2018: 6).

ausschließlich grüner Strom genutzt, ist der THG-Vorteil umso größer (Agora Verkehrswende 2019b, 2019a; BMU 2021: 6–7; Hoekstra 2019; Hoekstra & Steinbuch

2020; ICCT 2021; Specht & Fabianek 2022: 13–23; T&E 2020, 2022; Wietschel, Kühnbach & Rüdiger 2019).

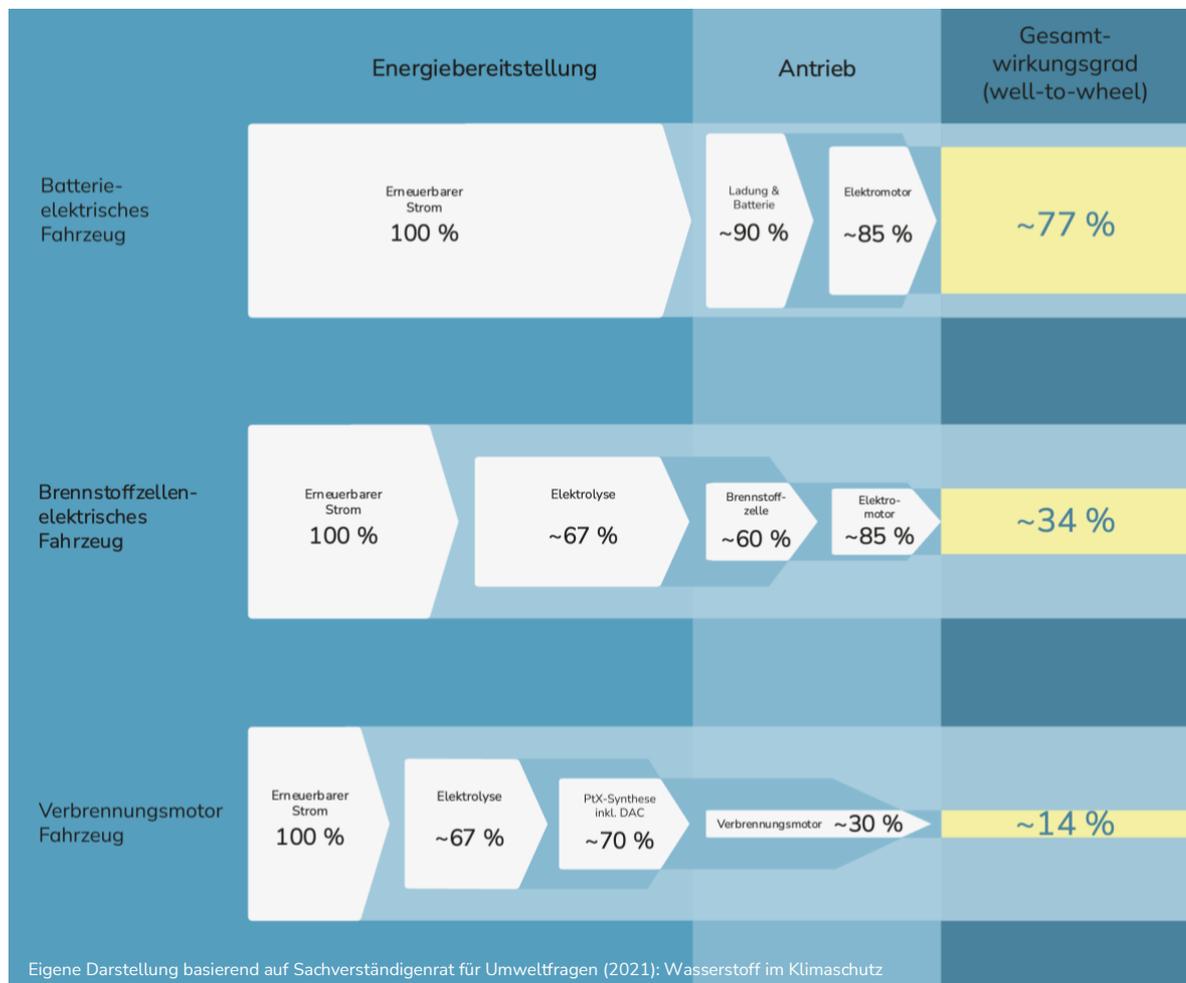


Abbildung 6: Energetischer Gesamtwirkungsgrad verschiedener Antriebsoptionen¹⁰

Die Vorteile von einem Batterie^{FZ} werden ökonomisch insbesondere in dem geringeren Wartungsaufwand für einen elektrischen Antrieb im Vergleich zu einem E-Fuels^{FZ} mit Verbrennungsantrieb sowie in den geringeren Energiekosten durch die direkte Stromnutzung im Vergleich zu einem

Brennstoffzellen^{FZ} sowie einem E-Fuels^{FZ} gesehen.

Vorteilhaft ist für ein Batterie^{FZ} zudem, dass analog zum Brennstoffzellen^{FZ} und in Kontrast zu einem E-Fuels^{FZ} bei einem Batterie^{FZ} keine weiteren Luftemissionen (Stickoxide (NO_x) und Feinstaub) ausgestoßen werden.

¹⁰ Der Gesamtwirkungsgrad-Vergleich in dieser Studie vernachlässigt die Transport- & Speicherverluste, da diese insbesondere im Bereich Brennstoffzellen^{FZ} je nach Herkunft und Kompression des grünen Wasserstoffs stark variieren. Für Strom können nationale Netzverluste von rund 4,5 % angenommen werden (BNetzA 2022: 35), für grünen Wasserstoff aus nationaler Produktion Transport- & Speicher-Verluste von 15 % (Quaschnig 2018: 344) und für importierten Wasserstoff Transportverlust von 1 % (1.000 km Pipeline) bis 44 % (Fischer-Tropsch-Produkte 10.000 km per Schiff) (Staiß, Adolf, Ausfelder et al. 2022: 42). Tendenziell wird der Gesamtwirkungsgrad durch die Einbeziehung der Transport- & Speicherverluste für ein Batterie^{FZ} gegenüber einem Brennstoffzellen^{FZ} noch vorteilhafter.

Ein weiterer, gesamtsystemischer Vorteil von einem Batterie^{FZ} ist, dass dessen Batterie als „vehicle-to-grid“ durch bidirektionales Laden auch als Energiespeicher systemdienlich eingesetzt werden kann. So können durch automatisiertes Laden und Entladen an der Haussteckdose gesamtsystemische Schwankungen in der Erzeugung erneuerbarer Energien ausgeglichen werden. In einem Brennstoffzellen^{FZ} ist dies aufgrund der kleineren eingebauten Batterie nur eingeschränkt möglich.

Die Nachteile von einem Batterie^{FZ} sind die vergleichsweise geringe gravimetrische und volumetrische Dichte der Batterie (Lithium-Batterie: 0,1 bis 0,2 kWh/kg bzw. 0,25 bis 0,67 kWh/dm³) (Kurzweil & Dietlmeier 2018: 484) (siehe Abbildung 7). Zwar ist der Elektromotor deutlich leichter als ein Verbrennungsmotor, doch kann dies das Zusatzgewicht einer Batterie bislang nicht kompensieren (Agora Verkehrswende 2022: 23; NOW GmbH 2021c: 49–50). Dies bedeutet einen entscheidenden Nutzlastverlust für Fahrzeuge im Nutzfahrzeuge-Bereich. So wurde das zulässige Gesamtgewicht im Nutzfahrzeuge-Bereich für Batterie^{FZ} (sowie Brennstoffzellen^{FZ} und Oberleitungs^{FZ}) um bis zu 2 Tonnen erhöht, um das Zusatzgewicht einer Batterie auszugleichen. Durch diese Nutzlastkompensation und durch den zu erwartenden technologischen Fortschritt wird davon ausgegangen, dass bis 2030 der Nutzlastverlust für ein Batterie^{FZ}-LKW im Vergleich zu einem Fossilien^{FZ} komplett kompensiert werden kann (Agora Verkehrswende 2022: 23–24).

Nachteilig für ein Batterie^{FZ} ist zudem dessen vergleichsweise lange Ladezeit und damit begrenzte Reichweite. Die Ladezeit kann

zwar durch Schnelllade-Funktionen reduziert werden,¹¹ dabei steigen jedoch die Ladeverluste und somit sinkt der Gesamtwirkungsgrad. Alternativ könnte normierte Batterie als Ganzes gewechselt werden, sodass die Ladedauer minimiert wird.¹² Insgesamt nimmt die Reichweite zu, sodass potenzielle unterwegs weniger Tankstopps notwendig werden. Aktuell sind im PKW-Batterie^{FZ} mit einer Reichweite bis zu 700 km pro Ladung erhältlich (Wiehl 2023).

Zudem ist die Leistung der Lithium-Ionen-Batterie von Temperatur, Ladezustand und Alterung abhängig. So sinkt die Kapazität und damit die verfügbare Reichweite ab Temperaturen unterhalb des Gefrierpunkts, da der Innenwiderstand des Akkus mit sinkender Temperatur steigt. Zusätzlich nimmt die Alterung bei hohen Temperaturen über 40 °C zu, wodurch sich der Wirkungsgrad verschlechtert (Füssel 2017: 20). Aufgrund dieser zu erwartenden Degradation der Batterien wird bei Neufahrzeugen daher in der Regel eine geringere Nettokapazität angegeben als eigentlich vorhanden, um die angegebene Kapazität über eine bestimmte Zeitdauer gewährleisten zu können.

Eine weitere anspruchsvolle, aber technisch lösbare Herausforderung eines Batterie^{FZ} ist gesamtsystemisch das gleichzeitige Laden von mehreren Fahrzeugen insbesondere am Niederspannungsnetz (Haushalte), welches zu Überlastungen und damit Stromausfällen führen kann (Liu 2018; Nobis 2016).

Problematisch für ein Batterie^{FZ} ist der Einsatz von konfliktären Rohstoffen (insbesondere Kobalt, Nickel und Lithium) (DESTATIS (2022))(Bechberger & Vorholt

¹¹ Ein normaler Hausanschluss lädt mit 3,7 kW (Haushaltssteckdose) bis zu 22 kW (über Wallbox). Gleichzeitig wird bereits an MW-Ladeleistung für den Schwerlastverkehr geforscht, beispielsweise im Rahmen der Charging Interface Initiative (CharIN): www.charin.global.

¹² Dafür sei im nationalen Kontext das Beispiel der Batteriewechselstation INFRADianba in Berlin (www.infradianba.com) oder die Power-Swap-Station Initiative von NIO genannt (NIO 2022).

2021; Kurzweil & Dietlmeier 2018: 484; Öko-Institut 2017; UBA 2020b; VDI & VDE 2019: 40–43) (siehe Tabelle 1). Hier gilt es insbesondere, die Nachfrage nach den konfliktären Rohstoffen zu minimieren. Dies kann durch die Verbesserung der Recycling-Möglichkeiten sowie die Weiterentwicklung der Batterietechnologie in Richtung höherer Effizienz oder durch die Substitution von konfliktären Rohstoffen geschehen (z.B. Forschung an Feststoff- oder Natrium-Batterien). Zudem sind die Umwelt- und Sozialbedingungen der Förderung von konfliktären Rohstoffen zu verbessern (Öko-Institut 2017: 55–62). Zwar ist allgemein davon auszugehen, dass es genug Rohstoffe für die weltweite Antriebswende auf Batterie^{FZ} gibt (Fraunhofer ISI 2020: 13–14), gleichzeitig drohen neue Abhängigkeiten, da das Vorkommen mancher Rohstoffe auf wenige Staaten weltweit begrenzt ist (HSS

2019; NOW GmbH 2023: 6–7), stärker als das Vorkommen von fossilen Energien wie Erdöl oder Erdgas (IEA 2022c).¹³

In Deutschland sind aktuell rund 1.140.000 reine Batterie^{FZ} auf der Straße zugelassen, insbesondere PKWs (rund 1.013.000), LKWs (rund 61.000 – vermutlich vor allem im Bereich der leichten Nutzfahrzeuge (N2)) und Kraftomnibusse (rund 1.900) (Stand zum 01.01.2023 (KBA 2023)). Dafür sind aktuell 60.229 Normalladepunkte (mit Wechselstrom (AC)) und 11.862 Schnellladepunkte (mit Gleichstrom (DC)) in Betrieb (Stand zum 01.01.2023 (BNetzA 2023)). Die Bundesregierung hat im Klimaschutzprogramm 2030 das Ausbauziel beschlossen, bis 2030 ein Netz von 1 Millionen öffentlich zugänglichen Ladepunkten aufbauen zu wollen (BMU 2019: 78).

3.2 Brennstoffzellenelektrisches Fahrzeug (Brennstoffzellen^{FZ})

Wirkungsgrad Gesamt	~ 34 %	
Wirkungsgrad Energiebereitstellung	~ 67 %	
Wirkungsgrad Antrieb	~ 51 %	
Gravimetrische Dichte (700 bar, flüssig)	33,33 kWh/kg	33,33 kWh/kg
Volumetrische Dichte (700 bar, flüssig)	1,86 kWh/dm ³	2,1 bis 2,4 kWh/dm ³
Vorteile	<ul style="list-style-type: none"> • Rekuperation möglich • Vergleichsweise hohe gravimetrische/volumetrische Dichte (unter Druck) • Vergleichsweise geringere Tankzeiten 	
Nachteile	<ul style="list-style-type: none"> • Geringerer Wirkungsgrad als Batterie^{FZ} • Einsatz konfliktärer Rohstoffe (insbesondere Kobalt, Nickel, Lithium und Platin) • Aufbau neuer Tankinfrastruktur 	

¹³ Hier seien beispielsweise genannt:

- Lithium (insbesondere in Australien (rund 55 % der aktuellen Produktion und 25 % der Vorkommen) und Chile (rund 25 % der aktuellen Produktion und 35 % der Vorkommen)),
- Kobalt (insbesondere Demokratischen Republik Kongo (rund 70 % der aktuellen Produktion und 45 %)) oder
- Graphit (insbesondere China (rund 80 % der aktuellen Produktion und 20 % der Vorkommen) (IEA 2022a: 146–155).

Ein mit einer Brennstoffzelle angetriebenes Fahrzeug (Brennstoffzellen^{FZ}) kann in der Nutzung als treibhausgasneutral bezeichnet werden, wenn das Fahrzeug ausschließlich grünen Wasserstoff nutzt.

Das Brennstoffzellen^{FZ} ist mit einem energetischen Gesamtwirkungsgrad von ~ 34 % im Vergleich zu einem Batterie^{FZ} deutlich ineffizienter (siehe Abbildung 6)¹⁴ Zur Kraftstoffproduktion muss der grüne Strom in der Elektrolyse in grünen Wasserstoff umgewandelt werden (Wirkungsgrad ~ 67 %). In der Kraftstoffnutzung wird der Wasserstoff in einer Brennstoffzelle wieder in Strom umgewandelt (Wirkungsgrad ~ 60 %), um einen Elektromotor anzutreiben (Wirkungsgrad ~ 85 %). Analog zu einem Batterie^{FZ} kann auch durch die integrierte (kleinere) Batterie der Wirkungsgrad eines Brennstoffzellen^{FZ} durch die Nutzung von Rekuperation (Energie-Rückgewinnung im Bremsvorgang) weiter verbessert werden. Zudem kann die Abwärme der Brennstoffzelle insbesondere im Winter zur Beheizung genutzt werden und somit die Gesamteffizienz erhöhen. Die Herstellung eines Brennstoffzellen^{FZ} ist insbesondere durch die Batterie- und Brennstoffzellenherstellung energieintensiv. So werden aktuell in der Brennstoffzellen^{FZ}-Herstellung mehr THG-Emissionen als in der Fossiles^{FZ}-Herstellung ausgestoßen und geringfügig weniger als in der Batterie^{FZ}-Herstellung. Gleichzeitig sind über den gesamten Lebenszyklus hinweg in einem Brennstoffzellen^{FZ}-PKW die THG-Emissionen schon beim aktuellen nationalen Strommix geringer als bei einem konventionellen Fossiles^{FZ}. Wird zukünftig auch in der Herstellung ausschließlich grüner Strom

genutzt, ist der THG-Vorteil entsprechend größer gegenüber einem Fossiles^{FZ}. Gegenüber einem Batterie^{FZ} scheint ein Brennstoffzellen^{FZ} allerdings meist nachteilig (Agora Verkehrswende 2019b, 2019a; BMU 2021: 6–7; ICCT 2021; Specht & Fabianek 2022: 13–23; Wietschel, Kühnbach & Rüdiger 2019).

Die Vorteile von einem Brennstoffzellen^{FZ} werden insbesondere in der im Vergleich zu einem Batterie^{FZ} in der zumindest aktuell deutlich schnelleren Betankung und damit größeren Reichweite in der gleichen Zeitdauer gesehen. Ein Brennstoffzellen^{FZ} kann zudem über einen mit grünem Wasserstoff gefüllten Trailer betankt werden. In nicht an die Infrastruktur angeschlossenen Gebieten kann das praktikabler sein als ein Batterie^{FZ} über eine große mobile Batterie oder einen mit synthetischen Kraftstoffen betriebenen Generator zu laden. Somit ist die Möglichkeit einer verhältnismäßig einfacheren Betankung im peripheren Raum ein Vorteil für ein Brennstoffzellen^{FZ} gegenüber einem Batterie^{FZ}. Gleichzeitig ist nach dem aktuellen Technikstand eine solche periphere Betankung am einfachsten für ein E-Fuels^{FZ} durchzuführen.

Zudem hat Wasserstoff eine hohe gravimetrische Dichte (33,33 kWh/kg) und unter 700 bar Druck auch eine hohe volumetrische Dichte (1,86 kWh/dm³) (Kurzweil & Dietlmeier 2018: 484) (siehe Abbildung 7). Insbesondere für den Schwerlastverkehr die Verringerung des Gesamt-Fahrzeuggewichts und des Fahrzeugs-Volumens durch ein kleineres und leichteres Antriebssystem mit leichterer Batterie vorteilhaft. Insofern ist allgemein für ein Brennstoffzellen^{FZ} bereits mit dem aktuellem Technologiestand von keinem bzw.

¹⁴ (SRU 2021: 58). In der Literatur werden leicht abweichende Wirkungsgrade angenommen, bspw. Brennstoffzellen^{FZ} 26 % (acatech, Leopoldina & Akademiunion 2017: 31), 24–29 % (VDI & VDE 2022: 17) oder für ein Brennstoffzellen^{FZ}-LKW 31 % (Öko-Institut & HHN 2020: 44) und 25–35 % (Fraunhofer ISI 2018: 6).

zumindes im Batterie^{FZ}-Vergleich geringeren Nutzlastverlust im Vergleich zu einem Fossilien^{FZ} auszugehen (Agora Verkehrswende 2022: 24).

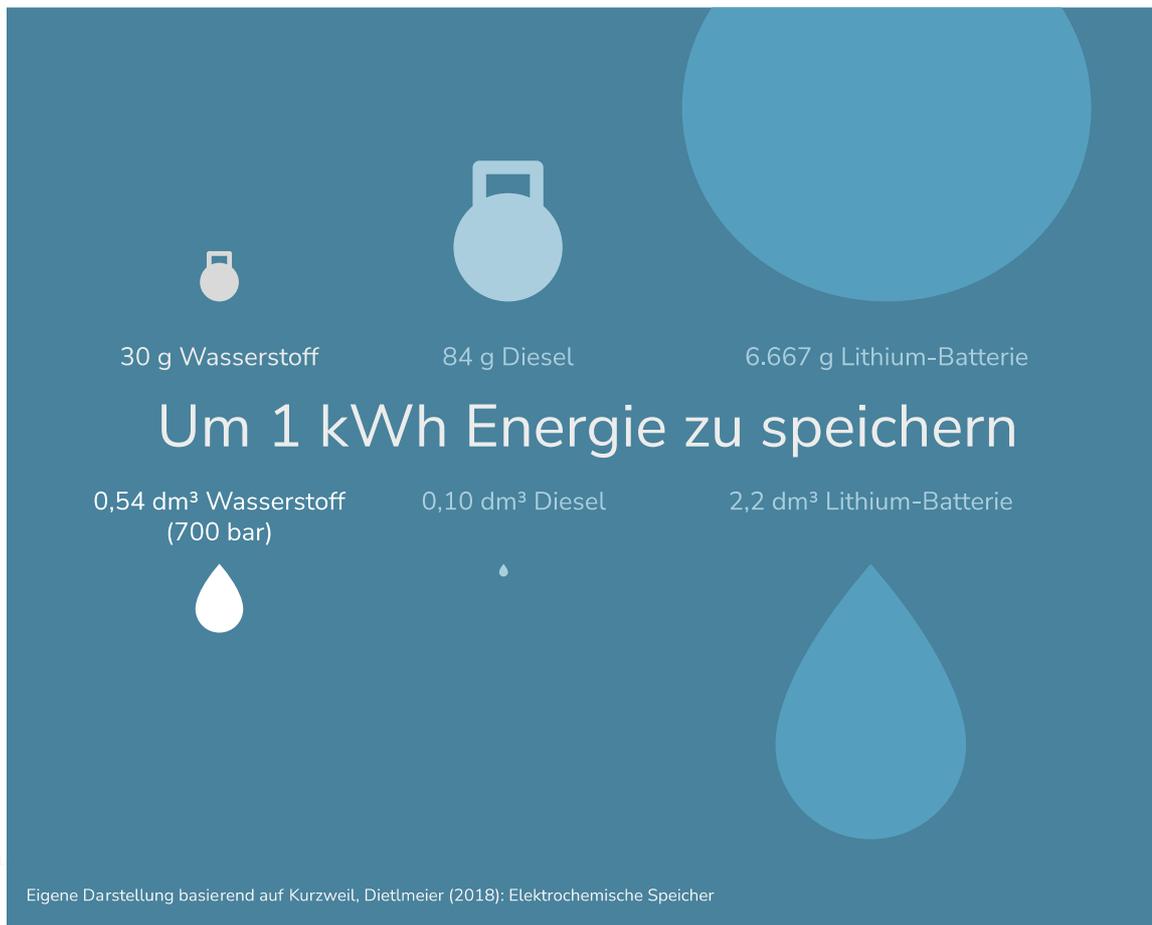


Abbildung 7: Vergleich der gravimetrischen und volumetrische Dichte von Wasserstoff, Diesel und Lithium-Batterie

In einem Brennstoffzellen^{FZ} wird der Wasserstoff nach heutigem Stand in Druckbehältern bei 350 bar oder 700 bar gespeichert. In PKWs wird der Wasserstoff auf 700 bar komprimiert, da auf diesem Druckniveau der beste Kompromiss zwischen der gravimetrischen und volumetrischen Dichte sowie dem Realgasverhalten von Wasserstoff besteht (Töpler, Lehmann & Weizsäcker 2017: 89). Bei Nutzfahrzeugen wird der Wasserstoff bisher überwiegend auf ein Druckniveau von 350 bar komprimiert, da zumeist entweder die Anforderung bzgl. der Reichweite an Nutzfahrzeuge geringer als bei PKWs ist oder die notwendige Volumenbegrenzung eine geringere Rolle

spielt. So kann dementsprechend der Aufwand der Kompression und der Vorkühlung reduziert werden (H2 Mobility 2021). Eine weitere mögliche Form der Speicherung ist die Kühlung des Wasserstoffs auf -253 °C, sodass dieser flüssig wird (Liquid Hydrogen bzw. LH₂). Der Vorteil dieser Speicherart ist die noch höhere volumetrische Dichte, wodurch größere Reichweiten durch kleinere Tankbehälter erzielt werden können. Gleichzeitig steigt der Energiebedarf für die Kühlung, dabei ist allerdings zu berücksichtigen, dass diese Technologie sich noch im Entwicklungsstadium befindet (H2 Mobility 2021).

Da die Brennstoffzelle einige Sekunden braucht, um die Betriebstemperatur (60 °C bis 90 °C) zu erreichen, wird die Batterie zum Kaltstarten und zur schnellen Leistungsabgabe z. B. beim Ampelstart eingesetzt (Doppelbauer 2020: 174). Im Gegensatz zur Batterie sind die Brennstoffzellen unempfindlicher gegenüber Temperaturschwankungen und die abgegebene Leistung ist unabhängig vom Füllgrad des Energiespeichers (VDI & VDE 2019: 27).

Auch für ein Brennstoffzellen^{FZ} gilt, dass die Nutzung konfliktärer Rohstoffe problematisch und die Recyclingmöglichkeiten bislang begrenzt sind. Im Vergleich zu einem Batterie^{FZ} werden durch die kleinere Batterie konfliktäre Rohstoffe im geringeren Maße eingesetzt, allerdings kommt Platin als konfliktärer Rohstoff in der Brennstoffzelle dazu (Öko-Institut 2017; UBA 2020b; VDI & VDE 2019: 40–43) (siehe Tabelle 1).

Eventuelle Sicherheitsbedenken bezüglich des Einsatzes von Wasserstoff in Brennstoffzellen^{FZ} können insoweit entkräftet werden, dass das Gefährdungspotenzial nicht höher einzuschätzen sei als in einem Fossilien^{FZ} (VDI & VDE 2022: 22).

Insgesamt ist ein Brennstoffzellen^{FZ} aufgrund der geringeren Effizienz eher für Anwendungsbereiche mit großer Reichweite bei kurzer Tankdauer oder bei volumen- oder gewichtssensiblen Anwendungsfällen interessant.

In Deutschland sind aktuell rund 2.140 reine Brennstoffzellen^{FZ} auf der Straße zugelassen, insbesondere PKWs (rund 1.990) und Kraftomnibusse (rund 70) (Stand zum 01.01.2023 (KBA 2023)). 2021 war rund 3 % der weltweiten Brennstoffzellen^{FZ}-Flotte in Deutschland zugelassen (IEA 2022b: 33).¹⁵

Aktuell sind in Deutschland öffentlich 163 Tankstellen mit 700 bar (in der Regel für PKW) und 51 Tankstellen mit 350 bar (in der Regel für Nutzfahrzeuge) in Betrieb (Stand zum 01.01.2023 (H2 Mobility 2023)).¹⁶ In Deutschland befand sich 2021 rund 13 % der weltweiten Wasserstoff-Tankstellen-Infrastruktur (IEA 2022b: 33). Zudem wird teilweise im Nutzfahrzeugbereich auch über Trailer als Betriebstankstellen nachgedacht, um zumindest in der aktuellen Phase von kleinen Brennstoffzellen^{FZ}-Flotten die Infrastrukturkosten durch mobile Tankstellen zu minimieren.

¹⁵ Weltweit ist der Schwerpunkt der rund 51.600 Brennstoffzellen^{FZ} in Korea (29 %), USA (27 %) China (24 %) und Japan (12 %) und somit außereuropäisch. Rund 80 % der weltweiten Brennstoffzellen^{FZ}-Fahrzeuge sind PKWs, rund 10 % Busse und rund 10 % LKWs. Rund 90 % der Brennstoffzellen^{FZ}-Busse und rund 95 % der Brennstoffzellen^{FZ}-LKW sind in China (IEA 2022b: 33).

¹⁶ Der aktuelle Ausbaustand sowie die Verfügbarkeit der Wasserstoff Tankstellen sind zu finden unter www.h2.live.

3.4 Verbrennungsmotor-Fahrzeug (E-Fuels^{FZ})

Wirkungsgrad Gesamt	~ 14 %	
Wirkungsgrad Energiebereitstellung	~ 47 %	
Wirkungsgrad Antrieb	~ 30 %	
Gravimetrische Dichte (Diesel, Benzin)	11,8 bis 11,9 kWh/kg	11,1 bis 12,1 kWh/kg
Volumetrische Dichte (Diesel, Benzin)	9,8 kWh/dm ³	8,2 bis 8,8 kWh/dm ³
Vorteile	<ul style="list-style-type: none"> • Vergleichsweise hohe gravimetrische/volumetrische Dichte • Nutzung der alten Tankinfrastruktur 	
Nachteile	<ul style="list-style-type: none"> • Geringster Wirkungsgrad • Einsatz konfliktärer Rohstoffe • Nur global THG-frei, nicht lokal • Freisetzung von weiteren Luftschadstoffen wie Feinstaub 	

Ein mit Verbrennungsmotor angetriebenes Fahrzeug (E-Fuels^{FZ}) kann in der Nutzung als treibhausgasneutral bezeichnet werden, wenn dieses ausschließlich mit klimaneutralen, synthetischen Kraftstoffen (PtX-Kraftstoff oder auch E-Fuels genannt) betankt wird. Im Vordergrund stehen dabei strombasierte E-Fuels, bei denen aus grünem Wasserstoff und atmosphärischem Kohlenstoffdioxid synthetische Kraftstoffe (bspw. synthetisches Diesel oder Kerosin) hergestellt werden. Kontrovers diskutiert wird, inwieweit biogene Kraftstoffe (ggf. auch ausschließlich fortschrittliche Biokraftstoffe aus Abfall- und Reststoffen) großskalig genutzt werden können sollten (Tank-Teller-Diskussion) (Deutsche Umwelthilfe, foodwatch, Greenpeace et al. 2022). Vor dem Hintergrund dieser Kontroverse wird in der Folge von einem rein strombasierten synthetischen Kraftstoff ausgegangen.

Ein E-Fuels^{FZ} ist mit einem energetischen Gesamtwirkungsgrad von ~ 14 % im

Vergleich zu einem Batterie^{FZ} und einem Brennstoffzellen^{FZ} signifikant ineffizienter (siehe Abbildung 6)¹⁷. Zur Kraftstoffproduktion muss der grüne Strom in der Elektrolyse in grünen Wasserstoff umgewandelt werden (Wirkungsgrad ~ 67 %). Anschließend wird der grüne Wasserstoff mit Kohlenstoff aus der Luft zu einem synthetischen Kraftstoff synthetisiert (Wirkungsgrad inklusive Direct Air Capture (DAC) ~ 70 %). In der Kraftstoffnutzung wird der synthetische Kraftstoff in einem Verbrennungsmotor verbrannt (Wirkungsgrad ~ 30 %). Der Wirkungsgrad im Verbrennungsmotor wird bereits jahrzehntelang optimiert, sodass hier im Vergleich zu einem Batterie^{FZ} oder Brennstoffzellen^{FZ} die zukünftigen Effizienzsteigerungsvorteile im Motor selbst als geringer angenommen werden können.

Der Vorteil für ein E-Fuels^{FZ} ist, dass die vorhandene Fahrzeug- und Tankinfrastruktur weitergenutzt werden

¹⁷ (SRU 2021: 58). In der Literatur werden leicht abweichende Wirkungsgrade angenommen, bspw. E-Fuels^{FZ} 13 % (acatech, Leopoldina & Akademienunion 2017: 31), 17-20 % (VDI & VDE 2022: 17), ~10 % (Ueckerdt, Bauer, Dirnächner et al. 2021: 387) oder für ein E-Fuels^{FZ}-LKW 21 % (Öko-Institut & HHN 2020: 44) oder 20-25 % (Fraunhofer ISI 2018: 6).

kann und nur die Produktion des Kraftstoffs angepasst werden muss. Somit ist ein E-Fuels^{FZ} der geringste invasive Eingriff in das bestehende System. Ein E-Fuels^{FZ} minimiert den Veränderungsbedarf durch die Antriebswende in der Fahrzeugherstellung sowie in dessen Nutzung. Zudem haben synthetischer Diesel und Benzin eine hohe gravimetrische und volumetrische Dichte (11,8 bis 11,9 kWh/kg bzw. 11,1 bis 12,1 kWh/kg und 9,8 kWh/dm³ bzw. 8,2 bis 8,8 kWh/dm³) (Kurzweil & Dietlmeier 2018: 484) (siehe Abbildung 7).

Der Nachteil eines E-Fuels^{FZ} ist insbesondere die deutlich geringere Energieeffizienz (um den Faktor 5 im Vergleich zu einem Batterie^{FZ}). Zudem ist ein E-Fuels^{FZ} nur gesamtsystemisch treibhausgasneutral – nicht lokal. Im lokalen Anwendungsbereich werden weitere THG wie CO₂ sowie weitere Luftschadstoffe wie NO_x oder Feinstaub ausgestoßen (T&E 2021b, 2021a). Auch für ein E-Fuels^{FZ} gilt, dass konfliktärer Rohstoffe genutzt werden, vor allem Platin und Palladium. Im Vergleich zu den anderen betrachteten Antriebsarten sind es allerdings

weniger (Öko-Institut 2017; UBA 2020b; VDI & VDE 2019: 40–43) (siehe Tabelle 1). So ist ein E-Fuels^{FZ} bezüglich der Nutzung konfliktärer Rohstoffe und potenzieller Entstehung neuer Abhängigkeiten gegenüber einem Batterie^{FZ} oder einem Brennstoffzellen^{FZ} vorteilhaft.

Als Sonderform eines E-Fuels^{FZ} wird insbesondere für den Schwerlastverkehr angedacht, grünen Wasserstoff direkt in einem Verbrennungsmotor zu verbrennen. Dies erfordert dann ebenso den Wasserstoff-Tankstellen Ausbau wie für ein Brennstoffzellen^{FZ}, bietet aber gegenüber einem Brennstoffzellen^{FZ} insbesondere Vorteile in der Kühlung (acatech & DECHEMA 2022: 54) sowie Gewichts- und Volumenvorteile bei einer Motorleistung von über 350 kW (NOW GmbH 2021c: 51), die insbesondere im Schwerlastverkehr vorteilhaft sein können. Zudem sind die Ansprüche an den Reinheitsgrad des Wasserstoffs in der Verbrennung geringer als bei einer Brennstoffzelle, was einen Kostenvorteil bedeutet.

Tabelle 1: Rohstoffbedarf eines Batterie^{FZ}/Brennstoffzellen^{FZ}/Oberleitung^{FZ} - PKW¹⁸

		Edel- und Halb-metalle			Platin-Gruppenmetalle			Seltene Erden				Sonstige Metalle					Nicht-Metall
		Gold	Silber	Kupfer	Platin	Palladium	Nickel	Neodym	Praseodym	Dysprosium	Terbium	Lithium	Kobalt	Gallium	Indium	Germanium	Graphit
Batterie ^{FZ}	Elektromotor																
	Leistungselektronik																
	Lithium-Ion-Batterie/Kabel																
	Ladestation/ - säule inkl. Kabel																
Brennstoffzellen ^{FZ}	Elektromotor																
	Leistungselektronik																
	Lithium-Ion-Batterie/Kabel																
	Brennstoffzellen-Komponenten (BZ-Systemmodul, -Stack, H ₂ -Tank)																
E-Fuels ^{FZ} bzw. Fossil ^{FZ}	Standardverkabelung im PKW																
	Weitere Elektro-Anwendungen (Lenkung, Bremsen, Elektronik)																
	Verbrennungsmotor und Anwendung (Katalysator, Motos, etc.)																
		Rohstoffe im mg-Bereich						Rohstoffe im g-Bereich				Rohstoffe im kg-Bereich					

¹⁸ Grundlage sind insbesondere (DERA 2021: 16; Fraunhofer ISI 2020; IEA 2022c: 6; UBA 2022b).

3.5 Oberleitungs-Fahrzeug (Oberleitung^{FZ})

Wirkungsgrad Gesamt	~ 80 %
Wirkungsgrad Energiebereitstellung	~ 100 %
Wirkungsgrad Antrieb	~ 80 %
Vorteile	<ul style="list-style-type: none"> • Hoher Wirkungsgrad • Rekuperation möglich • Vergleichsweise einfacher Antriebsstrang --> geringerer Wartungsaufwand
Nachteile	<ul style="list-style-type: none"> • Hoher Aufwand für Infrastrukturausbau • Einsatz konfliktärer Rohstoffe

Ein von einer Oberleitung angetriebenes Fahrzeug (Oberleitung^{FZ}) kann in der Nutzung als treibhausgasneutral bezeichnet werden, wenn die Oberleitung rein grünen Strom transportiert. Zudem muss ein Oberleitung^{FZ} mit einem batterieelektrischen, brennstoffzellenelektrischen oder synthetischen Antrieb für die Zu- und Abfahrt zu einer Oberleitung kombiniert werden.

Der Gesamtwirkungsgrad ist vergleichbar mit einem Batterie^{FZ} und beträgt rund ~ 80 %.¹⁹ Der grüne Strom kann als Energie direkt genutzt werden. In der Nutzung sind die Ladung und Speicherung in der Batterie (Wirkungsgrad ~ 90 %) sowie der Antrieb mit einem Elektromotor (Wirkungsgrad ~ 85 %) effizient.

Der Vorteil eines Oberleitung^{FZ} ist, dass durch die direkte Nutzung des Stroms aus der Oberleitung Gewicht durch eine kleinere Batterie eingespart werden kann. Zudem kann die Batterie während der Fahrt über Oberleitungen geladen werden. Die Oberleitung wird oberhalb der Straße installiert und hat somit keine Auswirkung

auf die Fahrbahnoberfläche.²⁰ Diese Technik ist prinzipiell bereits im Schienenbereich seit langem erprobt.

Für die Umsetzung wird ein Netz von rund 4.000 km auf den nationalen Autobahnen als erforderlich angesehen. Das entspricht einem Drittel des Autobahn-Netzes, auf dem 65 % des straßenbasierten LKW-Fernverkehrs stattfinden. Die Ausbauskosten dafür entsprechen in etwa 10 Mrd. € (Hacker, Jöhrens & Plötz 2020: 23–25).

Als Alternative zur Oberleitung ist es auch möglich, bspw. Induktionsspulen im Straßenbelag zu verankern (Beispiel Teststrecke am Hauptbahnhof in Karlsruhe). Eine solche induktive Lösung ermöglicht auch eine PKW-Mitnutzung, ist aber deutlich kostenintensiver und noch weniger erprobt (Hacker, Jöhrens & Plötz 2020: 5–7).

Bezüglich des Einsatzes von konfliktären Rohstoffen ist von einer ähnlichen Einschätzung wie bei einem Batterie^{FZ} auszugehen bzw. etwas geringer durch eine vergleichsweise kleinere Batterie.

¹⁹ (IFEU 2020: 5-6). In der Literatur werden leicht abweichende Wirkungsgrade angenommen, bspw. 57 – 70 % (VDI & VDE 2022: 17) oder für ein Oberleitung^{FZ}-LKW 73 % (Öko-Institut & HHN 2020: 44).

²⁰ Ein Beispiel für eine Oberleitung für den straßenbasierten Verkehr ist in der NRL-Modellregion die LKW-Teststrecke auf der A1 zwischen Reinfeld und dem Kreuz Lübeck in Schleswig-Holstein www.ehighway-sh.de.

4. Wirtschaftlichkeit und Marktentwicklung

Die *Antriebswende* wird durch verschiedene politische und ökonomische Rahmenbedingungen geprägt, die entscheidend für den Markthochlauf der jeweiligen Antriebstechnologie sind.

4.1 Politische Rahmenbedingungen

Politisch ist die *Antriebswende* im straßenbasierten Verkehr insbesondere durch die folgenden Rahmenbedingungen geprägt:²¹

- Mit dem **Klimaschutzgesetz** und dem dazugehörigen **Klimaschutzprogramm 2030** hat die Bundesregierung 2019 bezüglich der *Antriebswende* beschlossen, dass zur Erreichung der Klimaschutzziele bis 2030 eine Zielmarke von 7 bis 10 Millionen zugelassenen Elektro-PKW (Batterie^{FZ} & Brennstoffzellen^{FZ}) erreicht werden soll (BMU 2019: 76–77). Laut Koalitionsvertrag der aktuellen Ampel-Regierung soll die Zielmarke auf 15 Millionen vollelektrische PKW erhöht werden (SPD, BÜNDNIS 90 / DIE GRÜNEN & FDP 2021: 27). Im schweren Straßengüterverkehr soll 2035 ein Drittel der Fahrleistung batterieelektrisch, brennstoffzellen-elektrisch oder auf Basis strombasierter Kraftstoffe erfolgen (BMU 2019: 80).
- Im Rahmen des **FitFor55**²² hat die EU im März 2023 final beschlossen, die CO₂-Flottengrenzwerte für Neuwagen

(PKW und leichte Nutzfahrzeuge) mit Verbrennungsmotor ab 2035 auf null zu setzen. Dieser Grenzwert bedeutet das Aus für Fossil^{FZ}. Die Bedeutung von synthetischen Kraftstoffen für straßenbasierte E-Fuels^{FZ} nach 2035 ist noch nicht final geklärt, wird aber voraussichtlich höchstens eine Nischenanwendung sein (ADAC 2023).

- In der EU Erneuerbare-Energien-Richtlinie **RED II** ist ein Zielwert von mindestens 14 % erneuerbare Energie im Verkehrssektor für 2030 vorgegeben, dass jedes EU-Mitgliedsland einhalten muss.²³
- Die **Clean Vehicle Directive** bzw. deren nationale Umsetzung als **Gesetz über die Beschaffung sauberer Straßenfahrzeuge (SaubFahrzeugBeschG)** legt seit 2021 für die öffentliche Beschaffung Mindestanteile von „sauberen“ Fahrzeugen fest. So müssen im Zeitraum vom 2. August 2021 bis zum 31. Dezember 2025 für PKW und leichte Nutzfahrzeuge der Fahrzeugklasse N1, M1 und M2 38,5 %, für LKW der Fahrzeugklassen N2 und N3 10 Prozent und für Busse der Fahrzeugklasse M3 45 % als „sauber“ beschafft werden. Im Zeitraum vom 1. Januar 2026 bis zum 31. Dezember 2030 wird die Definition von „sauber“ verschärft sowie die Mindestanteile für PKW und leichte Nutzfahrzeuge

²¹ Zum europarechtlichen Hintergrund für den Verkehrssektor siehe auch (Hoffmann 2022).

²² Das FitFor55 Paket der EU bezieht sich auf das Ziel der EU, die Netto-THG-Emissionen bis 2030 um mindestens 55 % zu senken. Das vorgeschlagene Paket zielt darauf ab, die EU-Rechtsvorschriften mit dem Ziel für 2030 in Einklang zu bringen.

²³ In der Überarbeitung der RED II zur RED III hat die EU-Kommission in ihrem Entwurf das Ziel, im Verkehrssektor 2030 einen Anteil von 14 % erneuerbare Energien zu haben in das Ziel, bis 2030 die THG-Emissionen im Vergleich zum fossilen Basiswert (94 g CO₂Äq pro MJ) um 13 % zu reduzieren, geändert (European Commission 2021). Ob dies eine Verschärfung oder Aufweichung des 14 % Ziels aus RED II ist, kann aktuell noch nicht abgeschätzt werden (Hoffmann 2022).

der Fahrzeugklasse N1, M1 und M2 auf 38,5 %, für LKW der Fahrzeugklassen N2 und N3 auf 15 % und für Busse der Fahrzeugklasse M3 auf 65 % erhöht.²⁴

- Die Bundesländer der NRL-Projektregion wollen sich nach den **regionalen Wasserstoffstrategien** für günstige Rahmenbedingungen einsetzen, sodass bis 2025 die Nachfrage nach grünem Wasserstoff zur Anwendung im Verkehrssektor deutlich steigt. Explizit genannt werden schwere Nutzfahrzeuge (z. B. LKW, Müllfahrzeuge), Spezialfahrzeuge, Intralogistik, Busse, PKW (sofern die Nutzung batterieelektrischer Fahrzeuge unpraktikabel ist), Schienenverkehr, Schifffahrt, Fährverbindungen, Flugverkehr (Hansestadt Hamburg

2019: 37–38; MELUND SH 2020: 26; Wirtschafts- und Verkehrsministerien & der norddeutschen Küstenländer 2019: 21–22). Zudem soll, proportional umgerechnet auf die Modellregion des NRL, ein Netz von rund 110 Wasserstofftankstellen aufgebaut werden (dem NRL-Flächenanteil entsprechend) (Wirtschafts- und Verkehrsministerien & der norddeutschen Küstenländer 2019: 21).²⁵

Die genannten politischen Rahmenbedingungen zeigen den politischen Willen zur *Antriebswende*.

Zu diesen rechtlich-politischen Rahmenbedingungen kommen noch umweltökonomische Instrumente, die durch finanzielle Anreize die Antriebswende antreiben sollen (siehe Kapitel 4.2.2).

4.2 Ökonomische Rahmenbedingungen der Antriebswende

Für die Antriebswende sind bezüglich der ökonomischen Rahmenbedingungen neben den konkreten Anschaffungs- und Betriebskosten (siehe Kapitel 4.2.3) auch die

grundlegenden umweltökonomischen Instrumente relevant (siehe Kapitel 4.2.2 und 4.2.3).

4.2.1 Anschaffungs- und Betriebskosten der Antriebswende

Bezüglich der Bedeutung der Anschaffungs- und Betriebskosten für eine Vorteilhaftigkeitsbetrachtung variieren die kritischen Kostenpositionen je nach Fahrzeugtyp und Anwendungsfall. Beispielsweise sind für einen Spediteur mit hohen Jahres-Streckenleistungen die variablen Kosten vorrangig, während bei geringer Fahrleistung (bspw. Gabelstapler, Baufahrzeuge, etc.) die Anschaffungskosten entscheidender sind (VDI & VDE 2022: 25). Pauschal können im Folgenden nur

Tendenzen genannt werden, als ein konkretes Anwendungsbeispiel siehe die Vertiefung Abfallsammelfahrzeug (siehe Kapitel 5.4).

Anschaffungskosten (CAPEX)

Bezüglich der Anschaffungskosten sind die Fahrzeuge mit Verbrennungsmotor (Fossil^{FZ} bzw. E-Fuels^{FZ}) aktuell in der Regel am kostengünstigsten, gefolgt von Batterie^{FZ} und schließlich Brennstoffzellen Fahrzeugen (Brennstoffzellen^{FZ}). Die zum Teil noch

²⁴ Zur konkreten Umsetzung der Clean Vehicle Directive in der NRL-Modellregion siehe auch (IKEM 2021).

²⁵ Im europäischen Vergleich sehen in der politischen Zielsetzung außer Zypern sämtliche EU-Mitgliedsstaaten in dem Verkehrssektor eine relevante Anwendung von Wasserstoff (Wolf & Zander 2021).

deutlichen Mehrkosten insbesondere für Brennstoffzellen^{FZ} sind wesentlich durch die derzeit noch nicht vorhandene Technologie- bzw. Serienreife begründet. Nach einem erfolgten Markthochlauf dürfte aufgrund von Skaleneffekten von spürbaren Preisrückgängen auszugehen sein. Um aktuell den Markthochlauf zu beschleunigen und die Anschaffungskosten zu senken, hat die Bundesregierung verschiedene Förderprogramme eingeführt. Neben dem sogenannten „Umweltbonus“ für PKW und leichte Nutzfahrzeuge mit alternativem Antrieb sei hier insbesondere die Förderlandschaft der NOW GmbH für Nutzfahrzeuge genannt, die im Vergleich zu einem konventionellen Fossilen^{FZ} bis zu 80 % der Investitionsmehrkosten übernimmt.²⁶ Die Nachfrage ist dabei bislang in den ersten Förderrunden groß (NOW GmbH 2021a, 2022a).²⁷

Betriebskosten (OPEX)

Bezüglich der Betriebskosten sind insbesondere die Energiekosten zu nennen.

Strom: Es fällt in der Regel der normale Strompreis inklusive aller Abgaben und Umlagen an. Ggf. sind günstigere Stromtarife bei einer Ladung über Nacht oder zukünftig bei der Erbringung netzdienlicher Leistungen während des Ladens denkbar.

2021 betrug der Strompreis für Haushaltskunden durchschnittlich 0,33 €/kWh (BNetzA 2022: 286), für Gewerbekunden (50 MWh/Jahr) 0,23 €/kWh (BNetzA 2022: 284) und für Industriekunden 0,17 €/kWh (24 GWh/Jahr) (BNetzA 2022: 281).²⁸

Durch die Energiekrise 2022 ist der Strompreis deutlich gestiegen. Als Annäherung an den zukünftigen Strompreis soll hier die Strompreisbremse zu Grunde gelegt werden. So wird nach dem Strompreisbremsegesetz (StromPBG) 2023 der Strompreis für Entnahmestellen bis 30.000 kWh Strom-Jahresverbrauch_{2021/22} (Haushalte und Kleingewerbe) für 80 % des Strom-Jahresverbrauchs₂₀₂₂ auf 0,4 €/kWh (inklusive Netzentgelten, Steuern, Abgaben und Umlagen) gedeckelt werden. Für Entnahmestellen über 30.000 kWh Strom-Jahresverbrauch_{2021/22} soll für 70 % des Strom-Jahresverbrauchs_{2021/22} auf 0,13 €/kWh (zuzüglich Netzentgelten, Steuern, Abgaben und Umlagen) gedeckelt werden. Inklusive der Netzentgelte, Steuern, Abgaben und Umlagen (gewerblich ohne Umsatzsteuer) ergeben sich dann vereinfacht Strompreise von 0,40 €/kWh für Haushaltskunden, 0,34 €/kWh für Kleinunternehmen (unter 30.000 kWh/Jahr Unternehmen), 0,24 €/kWh für Gewerbekunden (50 MWh/Jahr) und 0,19 €/kWh für Industriekunden (24 GWh/Jahr).²⁹

Insbesondere in der privaten Nutzung muss neben dem Strompreis für Haushaltskunden auch der Strompreis an Ladesäulen berücksichtigt werden. Dieser betrug 2022 an normalen Ladesäulen₂₀₂₂ (AC) 0,36 €/kWh bis 0,49 €/kWh und an Schnellladesäulen₂₀₂₂ (DC) 0,39 €/kWh bis 0,74 €/kWh (ADAC 2022) und unterscheidet sich somit stark.

Inwieweit der steigende Bedarf nach grünem Strom bzw. der intensiviertere Ausbau der Erneuerbaren-Energie-Anlagen den

²⁶ Übersicht über verschiedene Förderprogramme: www.now-gmbh.de/foerderung/foerderfinder.

²⁷ Beispielsweise wurden in der ersten Richtlinie über die Förderung von Nutzfahrzeugen mit alternativen, klimaschonenden Antrieben in 330 Projekte 1.217 Fahrzeuge im Wert von rund 190 Millionen € bewilligt: In der Fahrzeugklasse N1 321 Batterie^{FZ} und 105 Brennstoffzellen^{FZ}, in der Fahrzeugklasse N2 161 Batterie^{FZ} und 4 Brennstoffzellen^{FZ} und in der Fahrzeugklasse N3 439 Batterie^{FZ} und 181 Brennstoffzellen^{FZ} (NOW GmbH 2022b).

²⁸ Die reinen Stromgestehungskosten für Wind und Solarstrom können mit 0,03 bis 0,12 €/kWh angenommen werden (Fraunhofer ISI 2021a).

²⁹ Details zur Berechnung siehe Anhang A: Tabelle Vergleich der Antriebs-Effizienz-Kosten.

Strompreis langfristig beeinflussen wird, ist noch unklar.

Wasserstoff: Der Preis für Wasserstoff ist aktuell an den Wasserstofftankstellen einheitlich durch die Clean Energy Partnership festgelegt worden. Anfangs betrug der Preis 9,5 €/kg (0,29 €/kWh), aktuell wurde dieser aufgrund der Energiekrise auf 12,85 €/kg (0,39 €/kWh) für 350 bar-Betankung und auf 13,85 € (0,42 €/kWh) für 700-bar Betankung angehoben.³⁰ Dabei muss der Markt für grünen Wasserstoff noch entwickelt werden, aktuell beträgt der Anteil von grünem Wasserstoff in einer Wasserstoff-Tankstelle nach Aussage der H2 Mobility derzeit im Durchschnitt nur rund 30 % (H2 Mobility 2022).³¹

Es ist davon auszugehen, dass der Preis von (grünem) Wasserstoff im Vergleich zu grünem Strom aufgrund des zu erwartenden Technologiefortschritts relativ gesehen sinken wird. Theoretisch könnte grüner Wasserstoff trotz Umwandlung aus grünem Strom mit entsprechenden Energieeffizienzverlusten bei hinreichender Technologieentwicklung kostengünstiger als grüner Strom werden, wenn dafür abgeregelter Strom genutzt wird oder der grüne Wasserstoff aus einem Energiesystem mit deutlich günstigeren grünen Strompreisen aufgrund vorteilhafter

klimatischer Bedingungen importiert wird, beispielsweise aus der MENA-region oder Südamerika (Staiß, Adolf, Ausfelder et al. 2022).

Synthetischer Kraftstoff: Aktuell beträgt der Herstellungspreis für synthetische Kraftstoffe in etwa 2,78 bis 4,5 €/l (Diesel: 0,28 bis 0,46 €/kWh) (Dena & LBST 2017: 9; Heinzmann, Glöser-Chahoud, Dahmen et al. 2021: 69; Jacob 2019: 164). Perspektivisch wird für 2050 ein Herstellungspreis von 0,98 bis 1,57 €/l (Diesel: 0,10 bis 0,16 €/kWh) (Agora Energiewende, Agora Verkehrswende & Frontier Economics 2018; Dena & LBST 2017: 9; IWES 2017; Wuppertal Institut 2019: 12–13) angenommen. Dazu kommen aktuell insbesondere die Energiesteuer (Diesel₂₀₂₂: 0,47 € und die Umsatzsteuer sowie die CO₂-Bepreisung und ggf. Mehrkosten durch die THG-Minderungsquote (siehe Kapitel 4.2.2). Für 2050 kann unter Vernachlässigung der weiteren Kosten für Transport und Vertrieb so für synthetischen Diesel₂₀₅₀ ein inflationsbereinigter Preis von rund 2,08 € angenommen werden.^{32 33}

Um die Kosten der Energie im Verkehrssektor miteinander vergleichen zu können, werden die reinen Energiekosten mit der Antriebs-Effizienz multipliziert in der Einheit €/Antriebs-kWh verglichen, was nachfolgend geschieht (siehe Abbildung 8):³⁴

³⁰ Aktuell beträgt der reine Herstellungspreis für grünen Wasserstoff_{Q1-Q3 2022} 9,66 €/kg, in einem optimierten Elektrolyseur (Optimierung: Betriebsstundenreduzierung auf die 4000 günstigsten Strompreisstunden/Jahr) 6,53 €/kg (E-Bridge 2022: 6). Die zusätzlichen Kosten für einen Tankstellenbetrieb können mit einem Aufschlag von 2-4 €/kg (Reuß, Grube, Robinius et al. 2019), rund 4,5 €/kg ((Zhou & Searle 2022) bzw. 2,7 – 8 €/kg (Demir & Dincer 2018) angenommen werden (entsprechen 0,06-024 €/kWh).

³¹ Hier ist zu betonen, dass H2-Mobility von einem weiteren Begriff von grünem Wasserstoff nutzt als diese Studie – der Wert für grüner Wasserstoff umfasst neben der Elektrolyse auch Wasserstoff auf Grundlage von Biomethan und Biomethanol.

³² Details zur Berechnung siehe Anhang A: Tabelle Vergleich der Antriebs-Effizienz-Kosten.

³³ Nimmt man den Deckungsbeitrag von fossilem Diesel als Orientierung (Kosten für Transport, Lagerhaltung und gesetzliche Bevorratung sowie etwaige Gewinnaufschläge), dann betragen die Kosten aktuell inklusive CO₂-Bepreisung rund 0,18 € (de Haas, Herold & Schäfer 2019; Wissenschaftlichen Dienste des Deutschen Bundestages 2022).

³⁴ Dafür werden die Energiekosten in €/kWh umgerechnet und mit der Antriebs-Effizienz (siehe Abbildung 6) multipliziert, um in der so neu geschaffenen Einheit €/Antriebs-kWh die Energiekosten miteinander vergleichen zu können.

Kosten der Energie inklusive Antriebseffizienz in €/Antriebs-kWh - privater Anwendungsbereich -

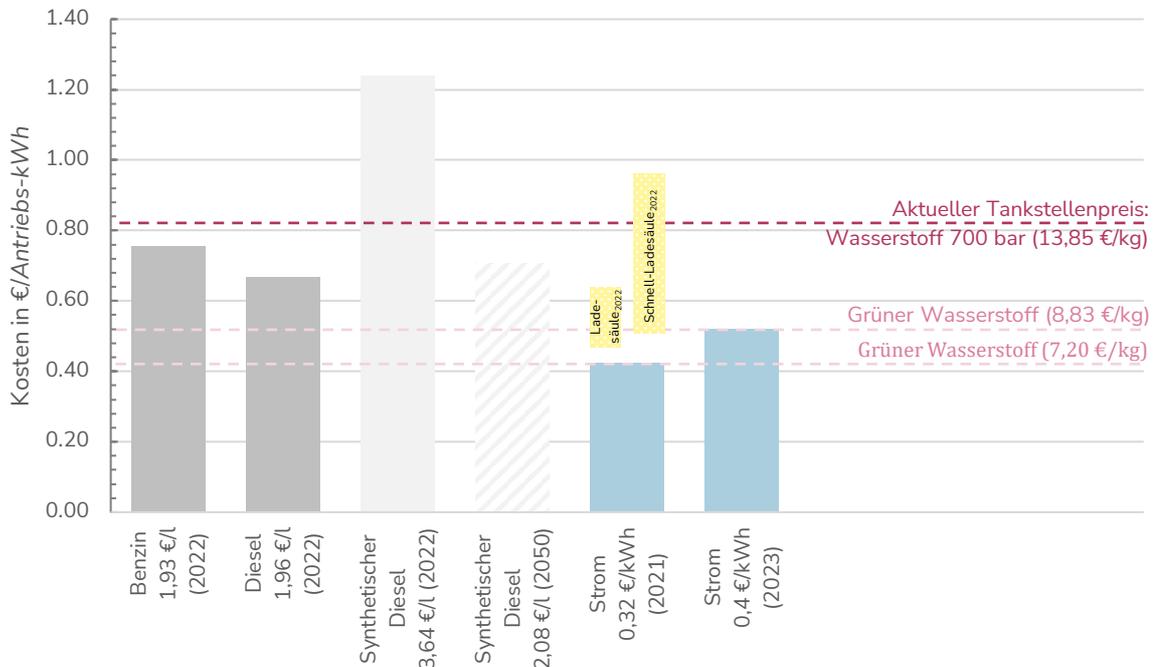


Abbildung 8: Kosten der Energie inklusive Antriebseffizienz in €/Antriebs-kWh - privater Anwendungsbereich³⁵

Für die **private Anwendung** zeigt Abbildung 8, dass im Vergleich zu fossilem Benzin₂₀₂₂ (0,76 €/Antriebs-kWh) und fossilem Diesel₂₀₂₂ (0,67 €/Antriebs-kWh) grüner Strom₂₀₂₃ (0,51 €/Antriebs-kWh) bereits bei Haushaltsstrombezug deutlich kostengünstiger ist.³⁶ Kostengünstiger ist grüner Strom auch von normalen Ladesäulen₂₀₂₂ (0,47 bis 0,64 €/Antriebs-kWh). Bei der Nutzung von Schnell-Ladesäulen₂₀₂₂ (0,51 bis 0,96 €/Antriebs-kWh) ist dies stark tarifabhängig und kann sogar deutlich teurer als die fossilen Kraftstoffe sein. Synthetischer Kraftstoff (Diesel₂₀₅₀: 0,71 €/Antriebs-kWh) wird

perspektivisch in etwa bei den heutigen Antriebs-kWh Kosten von Diesel₂₀₂₂ und Benzin₂₀₂₂ liegen und somit teurer als Haushaltsstrom sein. Der aktuelle Tankstellen-Wasserstoff-Mix₂₀₂₂ (0,82 €/Antriebs-kWh) ist ebenfalls aktuell deutlich teurer als grüner Strom. Somit ist grüner Strom (insbesondere Haushaltsstrom) der kostengünstigste Energieträger in der privaten Anwendung. Damit grüner Wasserstoff im privaten Verkehrssektor günstiger als grüner Strom wird, dürfte dieser aktuell maximal 8,83 €/kg (Strom₂₀₂₃) bzw. 7,20 €/kg (Strom₂₀₂₁) kosten.

³⁵ Details zur Berechnung siehe Anhang A: Tabelle Vergleich der Antriebs-Effizienz-Kosten.

³⁶ Diese Aussage gilt auch für die Preise von vor der Energiekrise: 2021 war der Antrieb aus grünem Strom₂₀₂₁ (0,42 €/Antriebs-kWh) kostengünstiger als aus fossilem Benzin₂₀₂₁ (0,62 €/Antriebs-kWh) und fossilem Diesel₂₀₂₂ (0,48 €/Antriebs-kWh).

Kosten der Energie inklusive Antriebseffizienz in €/Antrieb-kWh - gewerblicher Anwendungsbereich (ohne USt.) -

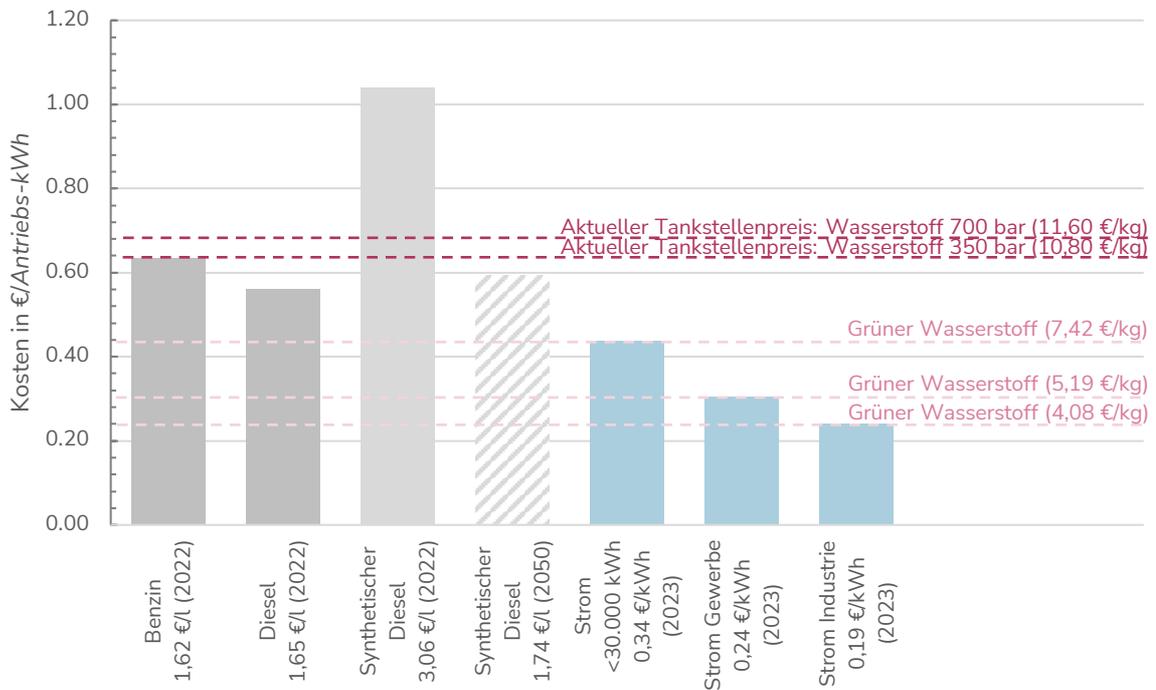


Abbildung 9: Kosten der Energie inklusive Antriebseffizienz in €/Antrieb-kWh- gewerblicher Anwendungsbereich (ohne USt.)³⁷

Für die **gewerbliche Anwendung** zeigt Abbildung 9, dass im Vergleich zu Benzin₂₀₂₂ (0,55 €/Antriebs-kWh) und Diesel₂₀₂₂ (0,56 €/Antriebs-kWh) im gewerblichen Bereich auch grüner Strom₂₀₂₃ für Kleinunternehmen (0,44 €/Antriebs-kWh), Gewerbekunden (0,31 €/Antriebs-kWh) und Industriekunden (0,24 €/Antriebs-kWh) deutlich kostengünstiger ist.³⁸ Auch synthetischer Kraftstoff (Diesel₂₀₅₀: 0,59 €/Antriebs-kWh) wird perspektivisch bei den heutigen Antriebs-kWh-Kosten von Diesel₂₀₂₂ und Benzin₂₀₂₂ liegen und somit deutlich teurer als Strom sein. Im gewerblichen Bereich ist der aktuelle Tankstellen-Wasserstoff-Mix₂₀₂₂ (350 bar:

0,64 €/Antriebs-kWh; 700 bar (0,69 €/Antriebs-kWh) aufgrund der günstigeren Strompreise vergleichsweise noch teurer als im privaten Bereich. Damit grüner Wasserstoff als Energie im gewerblichen Verkehrssektor günstiger als grüner Strom wird, dürfte dieser für Industriekunden maximal 4,08 €/kg, für Gewerbekunden 5,19 €/kg und für Kleinunternehmen 7,42 €/kg kosten.

Bezüglich der Energiekosten ist zudem allgemein das Einsparungspotential durch eine energiesparsame Fahrweise des Kraftfahrzeugs zu beachten. So zeigt eine Untersuchung bei Batterie^{FZ}-Bussen in

³⁷ Details zur Berechnung siehe Anhang A: Tabelle Vergleich der Antriebs-Effizienz-Kosten.

³⁸ Diese Aussage gilt auch für die Preise von vor der Energiekrise: 2021 war der Antrieb aus grünem Strom₂₀₂₁ (0,22 bis 0,36 €/Antriebs-kWh) kostengünstiger als aus fossilem Benzin₂₀₂₁ (0,52 €/Antriebs-kWh) und fossilem Diesel₂₀₂₂ (0,40 €/Antriebs-kWh).

Hamburg, dass eine sparsame Fahrweise zu Unterschieden im Energieverbrauch von 30 % bis zu teilweise 50 % führen kann (BSR electric 2020: 9–13). Inwieweit sich ein solches Einsparungspotential bei unterschiedlichen Antrieben unterscheidet, wurde hier nicht näher untersucht und bleibt somit unklar.

Aussagen bezüglich der Veränderung der Betriebskosten durch bspw. einerseits verlängertem Tank-/Lade-Aufwand und der Anfahrt von ggf. externen Tankstellen bzw. den Betrieb einer eigenen Tank-/Lade-Infrastruktur sowie andererseits durch geringere Wartungskosten eines Elektro-

Antriebs insbesondere im Vergleich zu einem Verbrennungs-Antrieb aber auch teilweise im Vergleich zu einem Brennstoffzellen-Antrieb können an dieser Stelle nur erwähnt, aber nicht konkretisiert werden.

Für den Betrieb sind bislang keine größeren Förderprogramme umgesetzt; Ansätze für eine OPEX-Förderung könnten hier perspektivisch ein herkömmlicher Zuschuss im Rahmen der europäischen Klima-, Umwelt- und Energiebeihilfeleitlinien (KUEBLL) oder das Instrument der Carbon Contracts for Difference (CCfD) sein.

4.2.2 Umweltökonomische Instrumente im Verkehrssektor

In das Preisgefüge von fossilem Kraftstoff zu erneuerbarer Energie greifen je nach Anwendungsbereich aktuell vor allem drei umweltökonomische Instrumente ein. Diese sollen im Folgenden anhand der wichtigsten Kriterien zur Bewertung umweltökonomischer Instrumente bezüglich

ihrer Wirkung bewertet werden (vgl. auch Tabelle 2). Anschließend wird die THG-Minderungsquote als umweltökonomisches Instrument mit der aktuell größten Wirkung für den Straßenverkehr vertieft (siehe Kapitel 4.2.3).

Tabelle 2: Vergleich der umweltökonomischen Instrumente EU-ETS, CO₂-Bepreisung und THG-Minderungsquote

	EU-ETS	CO ₂ -Bepreisung (Funktionsweise bis 2025/2026)	THG-Minderungsquote
Gesetzliche Grundlage	TEHG	BEHG	BImSchG
Ökologische Wirksamkeit (Wie treffsicher wird das gesetzte Ziel erreicht?)	Hoch (Das von der EU festgelegte CAP wird nicht überschritten)	Mittel (Fossile Kraftstoffe werden teurer, wodurch sich das Preisgefüge zugunsten erneuerbarer Energie verändert. Eine THG-Minderung ist erwartbar, aber	Mittel - Hoch (Fossile Kraftstoffe werden teurer und Erneuerbare Energien können einen Zusatzerlös erzielen, wodurch sich das Preisgefüge zugunsten erneuerbarer Energie verändert. Die konkrete THG-Minderung ist bezifferbar, wird allerdings durch verschiedene

		nicht genauer bezifferbar)	Mehrfachanrechnung verschiedener Erfüllungsoptionen verwässert.
	EU-ETS	CO₂-Bepreisung (Funktionsweise bis 2025/2026)	THG-Minderungsquote
Ökonomische Effizienz (Zu welchen gesamtwirtschaftlichen Kosten wird das Ziel erreicht?)	Prinzipiell Hoch (über den Marktmechanismus werden die THG-Emissionen gesamtwirtschaftlich zu den geringsten Vermeidungskosten eingespart) → entscheidend ausreichend ambitioniertes Cap wichtig	Gering (Die THG-Emissionen werden von jedem emittierenden Unternehmen gesenkt und nicht von den Unternehmen mit den gesamtwirtschaftlich geringsten Vermeidungskosten)	Gering (Die THG-Emissionen werden von jedem emittierenden Unternehmen gesenkt und nicht von den Unternehmen mit den gesamtwirtschaftlich geringsten Vermeidungskosten)
Dynamische Anreizwirkung (Welche Anreizwirkung wird geschaffen?)	Mittel (THG-vermeidende Technologie ist absehbar kostengünstiger, gleichzeitig sorgt der schwankende Preis der THG-Zertifikate für Investitionsunsicherheit)	Mittel-Hoch (Über die Bepreisung können externen Kosten entsprechend der jeweiligen THG-Emissionen eingepreist werden. So ist THG-vermeidende Technologie absehbar kostengünstiger, der festgelegte Preis sorgt zumindest mittelfristig für Investitionssicherheit bis 2025/26)	Mittel (THG-vermeidende Technologie ist absehbar kostengünstiger, gleichzeitig sorgt die aktuelle gesetzliche Diskussion zu Erhöhung/Senkung von Mehrfachanrechnungen sowie die allgemein schwankenden Quotenhandelsvertragspreise zu Investitionsunsicherheit)
Hohe Wirkung			
Mittlere bis hohe Wirkung			

Mittlere Wirkung

Geringe Wirkung

Europäische Emissionshandel (EU-ETS):

Zur Erreichung der Klimaschutzziele wurde der EU-ETS 2003 beschlossen und 2005 von der EU eingeführt. Er umfasst neben der energieintensiven Industrie und der Energiewirtschaft seit 2012 - bezüglich der Emissionen aus dem Verkehrssektor - den innereuropäischen Flugverkehr und soll die THG-Emissionen in diesem Bereich bepreisen. Damit umfasst er nicht den in dieser Studie fokussierten straßenbasierten Verkehr. Da die EU einen zweiten europäischen Emissionshandel angekündigt hat, der auch die straßenbasierten Verkehr umfassen soll und damit die beiden weiteren nationalen umweltökonomischen Instrumente CO₂-Bepreisung und THG-Minderungsquote ersetzen könnte, wird hier auch auf den EU-ETS als die vermutliche Grundlage dafür eingegangen (ENVI 2022). Deutschland hat das EU-ETS mit dem Treibhausgas-Emissionshandelsgesetz (TEHG) 2004 umgesetzt.

Mit dem umweltökonomischen Instrument EU-ETS hat die EU eine Obergrenze (Cap) von THG-Emissionen für die umfassten Sektoren festgelegt. Jeder THG-Emittent aus diesen Sektoren muss für die eigenen Emissionen ein entsprechendes Zertifikat nachweisen. Die Grundidee ist, dass dadurch THG-Emissionen mit den geringsten Vermeidungskosten zuerst eingespart werden sollen (hohe ökonomische Effizienz).

Der Preis für ein Zertifikat sank anfangs aufgrund der Überallokation von kostenlosen Zertifikaten von 21,80 €/t_{CO₂}-Äq (Jahresdurchschnitt 2005) auf durchschnittlich 0,70 €/t_{CO₂}-Äq (Jahresdurchschnitt: 2007). Über das 2005-

Niveau ist der Preis erst nach verschiedenen Reformen wieder 2019 mit rund 24,70 €/t_{CO₂}-Äq (Jahresdurchschnitt 2019) angestiegen und seitdem weiter auf rund 80,32 €/t_{CO₂}-Äq (Jahresdurchschnitt 2022) (EEA & Ember 2023; UBA 2023a).

Die Einnahmen aus dem EU-ETS fließen vollständig in den Klima- und Transformationsfonds (KTF). 2022 beliefen sich die Einnahmen über das EU-ETS auf 6,8 Mrd. € (UBA 2023a). Aus dem KTF werden Mittel für die Förderung der Energieversorgung und für den Klimaschutz bereitgestellt. Daraus fließen von den insgesamt rund 36 Mrd. € in den Verkehrssektor insbesondere die Zuschüsse zum Kauf elektrisch betriebener Fahrzeuge (Umweltbonus) (2023: 2,1 Mrd. €), Zuschüsse zur Errichtung von Tank- und Ladeinfrastruktur (2023: 1,9 Mrd. €), Förderung des Ankaufs von Bussen mit alternativen Antrieben (2023: 0,5 Mrd. €), Maßnahmen zur Weiterentwicklung der Elektromobilität (2023: 0,4 Mrd. €) sowie Zuschüsse für die Anschaffung von Nutzfahrzeugen mit alternativen, klimaschonenden Antrieben (2023: 0,4 Mrd. €) (Bundestag 2022).

Der Vorteil des EU-ETS ist, dass die absolute Obergrenze an THG-Emissionen durch den Cap wirksam begrenzt werden, weil der zuvor festgelegte Cap durch die regulierten THG-Emittenten in Summe eingehalten werden muss (hohe ökologische Wirksamkeit).

Der Nachteil ist, dass die THG-Einsparungen nicht durch bspw. den Staat gezielt in bestimmten Bereichen erfolgen, sondern der Markt über Angebot und Nachfrage regelt, wo die THG-Emissionen eingespart werden. So

führt individuelles Verhalten wie der Verzicht auf innereuropäische Flüge nicht zur gesamtsystemischen Senkung der THG-Emissionen, sondern verlagert diese zu anderen EU-ETS umfassende THG-Emittenten innerhalb der EU, die nun unter Einhaltung des Caps günstiger ein THG-Zertifikat kaufen und nutzen können (sogenannter „Wasserbett-Effekt“) (Agora Energiewende & Öko-Institut 2018; Wambach 2022). Zudem gibt es aufgrund des schwankenden Zertifikat-Preises nur geringe Planungssicherheit für emittierende Unternehmen (mittlere dynamische Anreizwirkung).

An der Umsetzung des umweltökonomischen Instruments EU-ETS wird kritisiert, dass sich infolge zu wenig ambitionierter Caps, krisenbedingter Produktions- und Emissionsrückgänge und der umfangreichen Nutzung von internationalen Projektgutschriften sich eine große Anzahl an Zertifikaten im EU-ETS angesammelt haben und somit der Marktmechanismus nicht richtig funktioniert (UBA 2022c). Ein Zertifikatspreis von 130 €/t_{CO₂-Äq} bis rund 300 €/t_{CO₂-Äq} wird als notwendig gesehen, um die Klimaziele wirksam zu erreichen (Pietzcker, Feuerhahn, Haywood et al. 2021; Wambach 2022: 28)

Nationaler Emissionshandel (CO₂-Bepreisung):

Deutschland hat seit 2021 mit dem Brennstoffemissionshandelsgesetz (BEHG) eine CO₂-Bepreisung für die nationalen THG-Emissionen der Sektoren Wärme und Verkehr eingeführt, da diese nicht vom EU-ETS erfasst werden. Es soll analog zum EU-ETS die THG-Emissionen bislang nicht erfasster Sektoren umfassen. Eine Integration der Sektoren Verkehr und Wärme in ein einheitliches Emissionshandelssystem wird

unter anderem deswegen als schwierig gesehen, weil von einer unterschiedlichen Wirkung eines einheitlichen CO₂-Äq-Preises in den spezifischen Sektoren auszugehen ist und somit ein „Wasserbetteffekt“ vermieden werden kann (höhere Grenzvermeidungskosten im privaten Bereich) (Felbermayr, Peterson & Rickels 2019)

Mit dem umweltökonomischen Instrument CO₂-Bepreisung (in seiner Wirkung bis 2025/26) hat die Bundesrepublik Deutschland einen festen Preis für THG-Emissionen in diesen Sektoren festgelegt. Jedes inverkehrbringende Unternehmen von fossilen Heiz- und Kraftstoffen wie Heizöl, Flüssiggas, Erdgas, Kohle, Benzin und Diesel muss entsprechend seiner Emissionen Zertifikate erwerben. Die Zertifikats-Preise sind bis 2025 festgelegt und verlaufen 2026 innerhalb eines Preiskorridors. Inwieweit der Preiskorridor danach weitergeführt wird oder sich der Zertifikats-Preis frei am Markt bilden kann, soll bis Ende 2024 evaluiert werden. Durch die derzeitige fixe Preisfestlegung entspricht die CO₂-Steuer damit in der umweltökonomischen Wirkung eher einer CO₂-Abgabe als einem Emissionshandelssystem.

Die festgelegte CO₂-Bepreisung beträgt nach einer Aussetzung der jährlich vorgesehen Preiserhöhung aufgrund der Energiepreiskrise (Bundesregierung 2022b) aktuell 2021: 25 €/t_{CO₂-Äq}, 2022: 30 €/t_{CO₂-Äq}, 2023: 30 €/t_{CO₂-Äq} (ursprünglich 35 €/t_{CO₂-Äq}), 2024: 35 €/t_{CO₂-Äq} (ursprünglich 45 €/t_{CO₂-Äq}), 2025: 45 €/t_{CO₂-Äq} (ursprünglich 55 €/t_{CO₂-Äq}). Für 2026 ist ein Preiskorridor zwischen 55 und 65 €/t_{CO₂-Äq} vorgesehen.

Analog zum EU ETS fließen die Einnahmen ebenso in den KTF. 2022 beliefen sich die Einnahmen über die CO₂-Bepreisung auf

6,4 Mrd. €. Sie sind damit vergleichbar mit den Einnahmen aus dem EU ETS (UBA 2023a).

Der Vorteil der CO₂-Bepreisung im Vergleich zum EU-ETS ist, dass durch eine feste Preisvorgabe eine gewisse Planungssicherheit für emittierende Unternehmen gegeben ist (mittlere bis hohe dynamische Anreizwirkung). Dagegen ist unklar, in welcher konkreten Höhe die THG-Emissionen dadurch tatsächlich gesenkt werden (mittlere ökologische Wirksamkeit). Zudem werden die pauschal bepreisten THG-Emissionen allgemein eingepreist und so ggf. nicht zwangsläufig in den Bereichen mit den volkswirtschaftlich geringsten Kosten reduziert (geringe ökonomische Effizienz). Damit die Klimaschutzziele 2030 erreicht werden, wird in diesen Sektoren eine CO₂-Bepreisung von 180 €/t_{CO₂-Äq} als notwendig gesehen (Bach, Isaak, Kemfert et al. 2019).

Treibhausgasminderungsquote (THG-Minderungsquote):

Die THG-Minderungsquote wurde 2015 als Nachfolger der 2007 eingeführten Biokraftstoffquote eingeführt. Sie ist insbesondere im Bundesimmissionsschutzgesetz (§ 37 a-c BImSchG) sowie deren nachgelagerten Verordnungen (10., 36., 37. und 38. BImSchV) geregelt und gilt ausschließlich für den Verkehrssektor. Grundlage ist insbesondere das Ziel, entsprechend der Erneuerbaren Energien Richtlinie der EU (RED II) einen nationalen Anteil von 14 % erneuerbarer Energie im Verkehrssektor bis 2030 zu erreichen.

Mit der THG-Minderungsquote werden die kraftstoffinverkehrbringenden Unternehmen von Otto- und Dieselkraftstoffen (bspw. Mineralölkonzerne) dazu verpflichtet, einen steigenden prozentualen Anteil der THG-

Emissionen ihrer fossilen Kraftstoffe zu senken. Die benötigte THG-Emissionssenkung können die kraftstoffinverkehrbringenden Unternehmen dazu bspw. von Ladesäulenbetreibenden, Wasserstoff-Tankstellen oder Batterie^{FZ} besitzhabende Personen über einen Quotenhandelsvertrag erwerben (Details siehe Kapitel 4.2.3).

Der Vorteil der THG-Minderungsquote ist, dass ähnlich wie bei der CO₂-Bepreisung durch eine feste Strafe für nicht erbrachte Quoten eine gewisse Planungssicherheit für emittierende Unternehmen gegeben wird (mittlere dynamische Anreizwirkung). Es ist zudem klar, in welcher konkreten Mindesthöhe die THG-Emissionen dadurch tatsächlich gesenkt werden (mittlere bis hohe ökologische Wirksamkeit). Gleichzeitig werden hier die THG-Emissionen pauschal bepreist und werden so allgemein eingepreist und nicht unbedingt in den Bereichen mit den volkswirtschaftlich geringsten Kosten eingespart (geringe ökonomische Effizienz).

Der durchschnittliche Preis betrug 2022 rund 450 €/t_{CO₂-Äq} (Olyx 2023). Die im Quotenhandelsvertrag geregelte Strafzahlung bei Nicht-Einhaltung der THG-Minderungsquote von 600 €/t_{CO₂-Äq} markieren hier die Preisobergrenze (faktischer Preisdeckel). Hervorzuheben ist, dass bei der THG-Minderungsquote die Kosten pro t_{CO₂-Äq} deutlich höher sind als aktuell im EU-ETS oder der CO₂-Bepreisung.

Für Kapitel 4.2.3 gilt zusammengefasst, dass jedes der drei umweltökonomischen Instrumente EU-ETS, CO₂-Bepreisung und THG-Minderungsquote spezifische Stärken und Schwächen hat, um die *Antriebswende* voranzutreiben. Während das EU-ETS bei hinreichend ambitionierten Zielen die höchste ökologische Treffsicherheit aufweist zu den effizientesten volkswirtschaftlichen

Kosten, führt es in der Praxis aufgrund der hohen und nicht genauer absehbaren Zertifikatspreisschwankungen zu einer geringeren Investitionssicherheit. Konträr dazu verlaufen das Instrument der CO₂-Bepreisung, sowie die THG-Minderungsquote.³⁹

Für den straßenbasierten Verkehrssektor sind aktuell insbesondere die CO₂-Bepreisung sowie die THG-Minderungsquote relevant. In welche Richtung sich die CO₂-Bepreisung über 2026 hinaus weiterentwickeln wird, ist auch aufgrund des auf EU-Ebene geplanten zweiten Emissionshandelssystem für den Straßen- und Gebäudesektor ab 2027 unklar.

³⁹ Hier sei auch darauf hingewiesen, dass es in der Praxis durch beispielsweise die dargestellte Verwässerung in der Umsetzung auch Zweifel an der tatsächlichen Wirkung dieser umweltökonomischen Instrumente gibt (Agora Energiewende & Öko-Institut 2018; DIW Econ 2021; Fredebeul-Krein, Koch, Kulesa et al. 2014: 475–480).

Tabelle 3: Mehrkosten Benzin und Diesel durch CO₂-Bepreisung und THG-Minderungsquote 2023 bis 2030

	CO ₂ -Bepreisung ⁴⁰			THG-Minderungsquote ⁴¹	
	Zertifikatspreis	Benzin	Diesel	Benzin	Diesel
2023	30 €/t CO ₂ -Äq	0,07 €/l	0,08 €/l	0,11 €/l	0,12 €/l
2024	35 €/t CO ₂ -Äq	0,08 €/l	0,09 €/l	0,13 €/l	0,14 €/l
2025	45 €/t CO ₂ -Äq	0,11 €/l	0,12 €/l	0,15 €/l	0,16 €/l
2026	55-65 €/t CO ₂ -Äq	0,13-0,16 €/l	0,15-0,17 €/l	0,17 €/l	0,18 €/l
2027	unklar			0,20 €/l	0,22 €/l
2028	unklar			0,24 €/l	0,27 €/l
2029	unklar			0,29 €/l	0,32 €/l
2030	unklar			0,35 €/l	0,38 €/l

Tabelle 3 zeigt, dass die THG-Minderungsquote im straßenbasierten Verkehrssektor im Vergleich zur CO₂-Bepreisung den bedeutenderen Verteuerungseffekt auf die fossilen Kraftstoffe Benzin und Diesel hat.

Zu dem konkreten Verteuerungseffekt kommen die zusätzlichen Erlöse für erneuerbare Energien im Verkehrssektor, wodurch sich das Preisgefüge fossiler Kraftstoffe zu erneuerbaren Energien zusätzlich zugunsten der erneuerbaren Energien verschiebt. Während über EU-ETS

und CO₂-Bepreisung zusammen 2023 rund 5,4 Mrd. € in den Verkehrssektor fließen, werden über die THG-Minderungsquote rund 7 Mrd. € an die Inverkehrbringer von erneuerbarer Energie im Verkehrssektor umverteilt.⁴²

Da die THG-Minderungsquote im Vergleich zur CO₂-Bepreisung die größere ökonomische Wirkung hat, wird in der Folge das umweltökonomische Instrument THG-Minderungsquote vertieft betrachtet (siehe Kapitel 4.2.3).

⁴⁰ CO₂-Bepreisung_{Benzin/Diesel} = Heizwertbezogener Emissionswert_{Benzin/Diesel} (EBeV 2022 Anlage 1) * MJ/l_{Benzin/Diesel} (umgerechnet nach EBeV 2022 Anlage 1) * Zertifikatspreis (§10(2) BEHG)

⁴¹ THG-Minderungsquote_{Benzin/Diesel} = Fossiler Basiswert (§ 3 38. BImSchV) * Minderungsquote (§ 37a Abs. 4 BImSchG) * MJ/l_{Benzin/Diesel} (umgerechnet nach EBeV 2022 Anlage 1) * THG-Quotenvertragswert (angenommen 450 €/t_CO₂-Äq). Die jährlich ansteigende Minderungsquote (siehe auch Abbildung 10) erhöht so stetig die THG-Minderungsquote_{Benzin/Diesel}.

⁴² (MengeDiesel₂₀₂₂ * HeizwertDiesel + MengeOttokraftstoffe₂₀₂₂ * HeizwertOttokraftstoffe) * THG-Minderungsquote₂₀₂₃ * fossilerBasiswert * WertQuotenhandelsvertrag
 = (32.245.000.000 kg Diesel (FNR 2023) * 36,17 MJ/kg Diesel (umgerechnet nach EBeV 2022 Anlage 1) + 15.810.000.000 kg Ottokraftstoffe (FNR 2023) * 32,84 MJ/kg Ottokraftstoffe (umgerechnet nach EBeV 2022 Anlage 1)) * 8 % * 94,1 g CO₂-Äq/MJ (§ 3 38. BImSchV) * 450 €/t_CO₂-Äq = 7,005 Mrd. €

4.2.3 Schwerpunkt THG-Minderungsquote

Entwicklung der THG-Minderungsquote 2015 - 2030

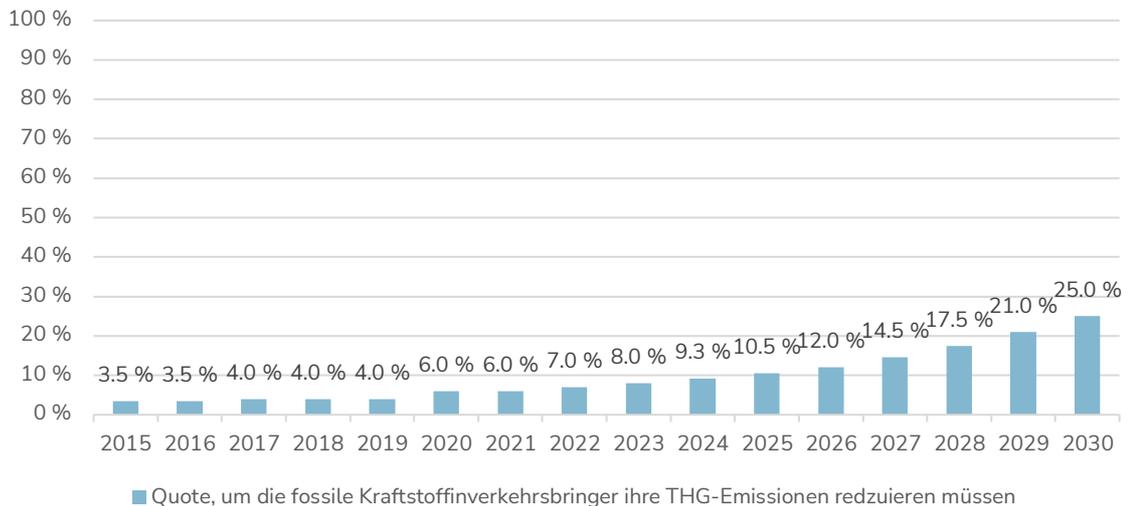


Abbildung 10: Entwicklung der THG-Minderungsquote 2015 - 2030

Abbildung 10 zeigt, wie die THG-Minderungsquote inverkehrbringenden Unternehmen von Otto- und Dieselmotoren (bspw. Mineralölkonzern) gemäß Bundesimmissionsschutzgesetz (§ 37a BImSchG) zunehmend dazu verpflichtet, die THG-Emissionen ihrer Kraftstoffe zu senken: von 3,5 % im Jahr 2015 über 8 % im Jahre 2023 auf 25 % im Jahre 2030 (siehe Abbildung 10).⁴³ Die Mengen an Beimischung von synthetischen biogenen Kraftstoffen wie beispielsweise E10 ist mittlerweile als Erfüllungsoption an ihre Grenzen geraten. Deshalb müssen die kraftstoffinverkehrbringenden Unternehmen zukünftig vermehrt über Quotenhandelsverträge ihre THG-Minderung erfüllen.

Für die Quotenhandelsverträge gibt es aus dem Bereich Batterie^{FZ} und

Brennstoffzellen^{FZ} zwei interessante Anbietergruppen:

- A) Betreibende Unternehmen von öffentlichen Ladepunkten und (Wasserstoff-)Tankstellen.
- B) Besitzende Personen von Fahrzeugen mit alternativen Fahrzeugantrieben.

Dabei können die Anbietergruppen ihre tatsächlich erbrachte THG-Minderung nach aktueller Gesetzeslage im Falle von Strom mit dem Faktor 3 und im Falle von Wasserstoff mit dem Faktor 2 multiplizieren.

Abbildung 11 zeigt die Erlöse für betreibende Unternehmen von öffentlichen Ladepunkten und (Wasserstoff-)Tankstellen (Fall A) bei einem angenommenen

⁴³ Von 2007 bis 2015 gab es nach § 37a BImSchG mit der Biokraftstoffquote eine ähnliche Mindestquote, die sich auf die konkret in den Verkehr gebrachte Menge an fossilen Kraftstoffen und nicht auf deren THG-Emissionen bezog.

Quotenhandelsvertragspreis von 450 €/t CO₂-Äq⁴⁴.

Fall A: Erlös über die THG-Minderungsquote (450 €/t CO₂-Äq) für öffentlich zugängliche Lade-/Betankungsinfrastruktur in €/kWh

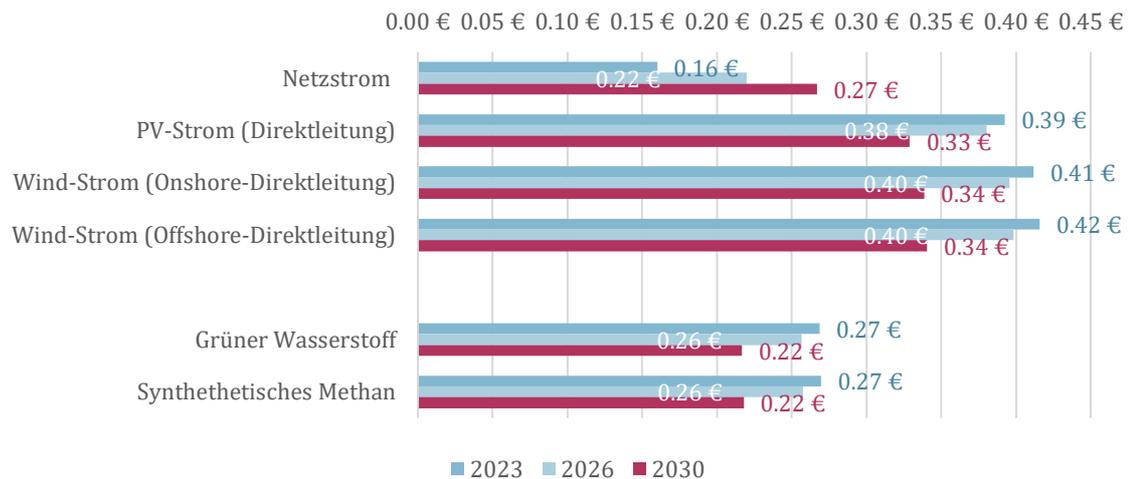


Abbildung 11: Fall A: Erlös über die THG-Minderungsquote (450 €/t CO₂-Äq) für öffentlich zugängliche Lade-/Betankungsinfrastruktur in €/kWh⁴⁵

Im Fall A sind die Zusatzerlöse von grünem Strom_{2023/2030}⁴⁶ durchweg größer als die von grünem Wasserstoff_{2023/2030}.⁴⁷ Die unterschiedlichen Zusatzerlöse ergeben sich insbesondere dadurch, dass die THG-Minderungswirkung von grünem Strom dreifach und von grünem Wasserstoff und synthetischem Kraftstoff nur zweifach angerechnet werden kann.

Vergleicht man diese Zusatzerlöse über die THG-Minderungsquote₂₀₂₃ von grünem Wasserstoff (0,27 €/kWh bzw. 8,96 €/kg) mit dem aktuellen Wasserstoff-Tankstellenpreis (netto 10,80 €/kg bzw. 11,64 €/kg) oder die

THG-Minderungsquote₂₀₂₃ von Netzstrom (0,16 €/kWh) mit dem durchschnittlichen Strompreis₂₀₂₃ (0,185 €/kWh bis 0,4 €/kWh)(siehe Kapitel 4.2), ergeben sich über die THG-Minderungsquote signifikante Zusatzerlöse. Diese Zusatzerlöse über die THG-Minderungsquote können die betreibenden Unternehmen von öffentlichen Ladepunkten und (Wasserstoff-)Tankstellen nutzen, um zusätzliche Infrastruktur auszubauen und/oder um den Preis für grünen Strom bzw. grünen Wasserstoff für die Kunden zu senken.

⁴⁴ Der Preis entspricht in etwa dem durchschnittlichen THG-Quotenvertragspreis 2022 für Quotenerfüllung durch Strom und Wasserstoff (Olyx 2023).

⁴⁵ Berechnungsgrundlage siehe Anhang B: Tabelle Erlös THG-Minderungsquote.

⁴⁶ Grüner Strom kann nach aktueller Gesetzeslage nur bei Direktleitung ohne Netzanschluss zur Erbringung der THG-Minderungsquote genutzt werden. Nach dem „Masterplan Ladeinfrastruktur II“ der Bundesregierung wird das BMUV dazu die Anrechnung von Grünstrom bei On-Site-Stromerzeugung trotz Netzkopplung, wo dies technisch möglich ist, zeitnah ermöglichen (Bundesregierung 2022a: 22).

⁴⁷ Bezieht man die *Antriebs-kWh* mit ein (siehe Kapitel 4.2), ist der Unterschied zwischen grünem Strom_{2023/2030} (2023: 0,30 - 0,32 €/Antriebs-kWh bzw. 2030: 0,25 - 0,26 €/Antriebs-kWh) und grünem Wasserstoff_{2023/2030} (2023: 0,14 €/Antriebs-kWh bzw. 2030: 0,11 €/Antriebs-kWh) prozentual noch größer.

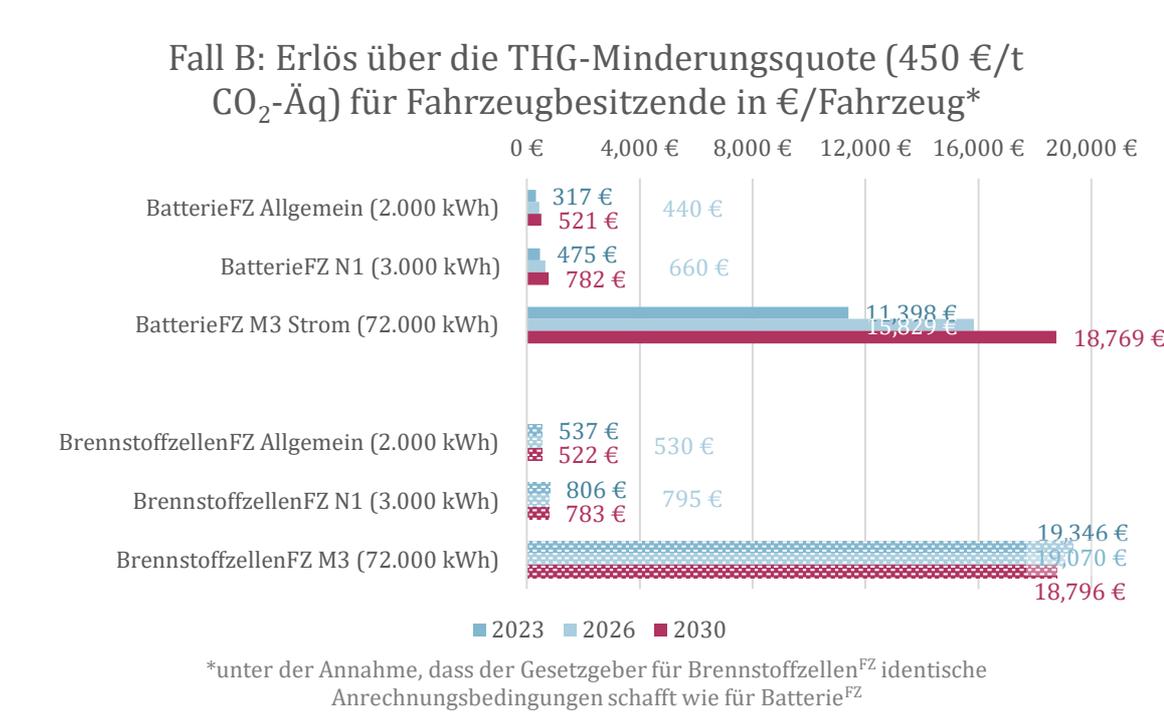


Abbildung 12: Fall B: Erlös über die THG-Minderungsquote (450 €/t CO₂-Äq) für Fahrzeugbesitzende in €/Fahrzeug⁴⁸

Im Fall A besteht das Problem, dass Unternehmen mit Betriebstankstellen oder Haushalte mit privater Wallbox von diesen Erlösen ausgeschlossen sind, da deren Infrastruktur nicht öffentlich zugänglich ist. Damit auch in diesen Fällen die Energiekosten für besitzende Personen von Fahrzeugen mit alternativen Fahrzeugantrieben durch die THG-Minderungsquote deutlich gesenkt und so die Konkurrenzfähigkeit von erneuerbarer Energie gegenüber fossilen Kraftstoffen frühzeitig erhöht wird, können die Fahrzeugbesitzenden Personen im Fall B pauschale Emissionsminderungszertifikate anbieten. Dabei wird je nach Fahrzeugklasse ein unterschiedlicher, pauschaler Jahresverbrauch von Energie zu Grunde gelegt.

Nach der aktuellen Gesetzeslage können nur Batterie^{FZ} entsprechende Zusatzerlöse erzielen, Brennstoffzellen^{FZ} sind

ausgeschlossen. Hier erwartet das UBA eine entsprechende „umfassende Novellierung der 37. BImSchV und der Anrechnungsvoraussetzungen insgesamt“ (Schürmann 2022a, 2022b). Im Folgenden wird daher angenommen, dass die BMUV einen identischen Jahresverbrauch von Brennstoffzellen^{FZ} und Batterie^{FZ} annehmen wird. Die gezeigten prognostizierten Erlöse für Brennstoffzellen^{FZ} basieren auf dieser Annahme.

Aktuell wird für ein Fahrzeug allgemein ein Jahresverbrauch von 2.000 kWh angenommen. Für Fahrzeuge der Klasse N1 3.000 kWh und für Fahrzeuge der Klasse M3 72.000 kWh (BMUV 2021).

Abbildung 12 zeigt die Erlöse für besitzende Personen von Fahrzeugen mit alternativen Fahrzeugantrieben (Fall B) bei einem Quotenhandelsvertragspreis von 450 €/t CO₂-Äq. Für ein allgemeines Batterie^{FZ} 2023

⁴⁸ Berechnungsgrundlage siehe Anhang B: Tabelle Erlös THG-Minderungsquote.

können für 2023 über die THG-Minderungsquote demnach Zusatzerlöse von rund 316 € erzielt werden.

Unter der hypothetischen Annahme, dass der Jahresverbrauch von 2.000 kWh identisch für ein allgemeines Brennstoffzellen^{FZ}₂₀₂₃ angerechnet werden könnte und von reinem grünem Wasserstoff ausgegangen wird, würden die Zusatzerlöse₂₀₂₃ rund 537 € betragen. Im Gegensatz zu Fall A wäre im hier gezeigten Fall B nun der Brennstoffzellen^{FZ}-Antrieb also ökonomisch vorteilhafter als ein Batterie^{FZ}-Antrieb. Dies liegt insbesondere daran, dass hier für Batterie^{FZ} der Bezug von allgemeinem Netzstrom statt von reinem grünem Strom angenommen wird, wodurch die THG-Minderungswirkung des anzurechnenden Stroms geringer ist. Perspektivisch ist durch einen höheren Anteil an grünem Strom im Netz ein höherer Erlös für ein Batterie^{FZ} im Vergleich zu einem Brennstoffzellen^{FZ} zu erwarten.

Zu beachten ist zudem, dass aktuell Kraftfahrzeuge der für die Brennstoffzellen^{FZ} interessanten Fahrzeugklassen N2 (mittlere Nutzfahrzeuge) und N3 (schwere Nutzfahrzeuge) im Vergleich zur Fahrzeugklasse M3 (Linien- und Reisebusse) deutlich benachteiligt werden. Für einen Linien- und Reisebus nimmt die BMUV 2023 einen pauschalen Verbrauch von 72.000 kWh/Jahr an, während für mittlere und schwere Nutzfahrzeuge kein pauschaler Verbrauch festgelegt wurde, sodass hier nur der allgemeine Fahrzeug-Verbrauch von 2.000 kWh/Jahr als Grundlage genommen werden darf (BMUV 2021). In der Praxis dürfte der Energieverbrauch eines schweren Nutzfahrzeugs gleichwertig oder höher als von einem Linien- und Reisebus einzuschätzen sein. Es ist also folgerichtig, dass hier zeitnah (eigentlich bis Q1/2023) eine Veröffentlichung von Schätzwerten

durch das BMUV für schwere Nutzfahrzeuge erfolgen sollen (Bundesregierung 2022a: 22).

In Fall A und B ist die Höhe der Zusatzerlöse auch abhängig von der zukünftigen Preisentwicklung für die THG-Emissionsminderungszertifikate. Eine Preisprognose ist schwierig, da sich der Preis am Markt bildet. Einerseits steigt in Zukunft der gesetzlich vorgeschriebene Anteil an erneuerbaren Energien im Verkehrssektor, womit auch die Nachfrage nach den Emissionsminderungszertifikaten zunehmen dürfte. Andererseits wird auch die Nutzung von grünem Strom und grünem Wasserstoff im Verkehrssektor sowie die Anzahl an Batterie^{FZ} und Brennstoffzellen^{FZ} zunehmen, wodurch das Angebot an Emissionsminderungszertifikaten steigt. Der Preis für die THG-Minderungsquote ist aktuell nach oben bei 600 €/t CO₂-Äq gedeckelt, nämlich der Pönale (Strafzahlung) bei Nichterfüllung der Quote (§ 37c Abs. 2 Satz 5-6 BImSchG). Die Preisuntergrenze wird aktuell bei 200 €/t CO₂-Äq gesehen (Olyx 2023), was in etwa einer linearen Reduzierung der hier dargestellten Erlöse um 55 % bedeuten würde.

In der politischen Diskussion über die kommende Umsetzung des delegierten Rechtsakts zur EU-Erneuerbaren-Energien-Richtlinie RED II bzw. der Novellierung des nationalen BImSchG wird über eine Anhebung der aktuellen Mehrfachanrechnung der THG-Minderungswirkung von Strom (dreifach auf vierfach) und Wasserstoff (zweifach auf dreifach bis vierfach) diskutiert, während der aktuelle Entwurf zur Erneuerbare-Energien-Richtlinie RED III der EU eine Streichung der Mehrfachanrechnung vorsieht. Eine Veränderung des Verhältnisses zwischen Wasserstoff und Strom verändert auch das

Erlösverhältnis zwischen diesen Antriebsoptionen.⁴⁹

Zusammengefasst kann die THG-Minderungsquote den Markthochlauf von alternativen Antriebsarten deutlich

beschleunigen, wenn deren Erlöse direkt an die Kunden weitergegeben werden oder direkt in den benötigten Ausbau von erneuerbaren Energien oder benötigter Infrastruktur investiert wird.

4.3 Markthochlauf und Geschäftsmodelle

Aufgrund der deutlichen Energieeffizienzvorteile und damit auch Kostenvorteile herrscht in der Literatur weitgehend Konsens darüber, dass ein Batterie^{FZ} im Vergleich zu einem Brennstoffzellen^{FZ} oder einem E-Fuels^{FZ} der stets zu bevorzugende Antriebstyp im Sinne einer energieeffizienten Energiewende ist (Agora Energiewende & Guidehouse 2021: 9-10; Agora Verkehrswende 2019b: 14-15;

NPM - AG 2 2020: 46; SRU 2021: 58; UBA 2019: 230; Wuppertal Institut 2020: 18). Gleichzeitig unterscheiden sich die Anforderungen an ein Kraftfahrzeug je nach Anwendungsfall, sodass eine Batterie^{FZ}-Lösung nicht immer ökonomisch sinnvoll und praktikabel nutzbar erscheint. Je nach Fahrzeugklasse gibt es daher in der Literatur unterschiedliche Prognosen über die sich durchsetzende Antriebstechnologie.

Tabelle 4: Antriebsvarianten in den verschiedenen Fahrzeugklassen

	Batterie ^{FZ}	Brennstoffzellen ^{FZ}	E-Fuels ^{FZ}	Oberleitung ^{FZ}
PKW (M1)	Blue	Yellow	Yellow	Purple
Leichte Nutzfahrzeuge (N1) städtischer & regionaler Lieferverkehr	Blue	Yellow	Yellow	Purple
Leichte Nutzfahrzeuge (N1) Fernfahrten	Yellow	Yellow	Yellow	Purple
Schwere Nutzfahrzeuge (N2-N3) Kurz und Mittelstrecken	Yellow	Yellow	Yellow	Yellow
Schwere Nutzfahrzeuge (N2-N3) Langstrecke	Yellow	Yellow	Yellow	Yellow
Linienbusse (M2-M3)	Yellow	Yellow	Yellow	Yellow
Reisebusse (M2-M3)	Yellow	Yellow	Yellow	Yellow
Schiene	Yellow	Yellow	Yellow	Blue
Binnenschifffahrt	Yellow	Yellow	Yellow	Purple
Hochseeschifffahrt	Yellow	Yellow	Blue	Purple
Flug Kurzstrecke	Yellow	Yellow	Blue	Purple

⁴⁹ Für eine vertiefende Betrachtung der diskutierten Vorschläge zur unterschiedlichen Mehrfachanrechnung sowie deren Implikationen für die Antriebswende siehe die (Bannert, Schütte & von Düsterlho 2023).

Flug Langstrecke
Markthochlauf primär mit dieser Technologie
Markthochlauf auf mittlere Sicht primär mit dieser Technologie erwartet
Markthochlauf unklar oder am Anfang, noch keine Dominanz einer Technologie absehbar
Markthochlauf ggf. als ergänzende Nischenanwendung neben einer dominierenden Technologie
Kein Markthochlauf dieser Technologie erwartet

Tabelle 4 zeigt, dass Batterie^{FZ} in den **leichten Fahrzeugklassen** (N1 und M1) als vorteilhaft gelten. In den Fahrzeugklassen M1 und N1 ist ein Batterie^{FZ} bereits wirtschaftlich konkurrenzfähig zu einem Fossilen^{FZ}. Brennstoffzellen^{FZ}-Technologie wird in den leichten Fahrzeugklassen ggf. als Ergänzung insbesondere für Nischenanwendungen bei geringen Standzeiten und häufigen Fernfahrten oder off-road Anwendungen gesehen.

In den **schweren Nutzfahrzeugklassen** (N2-N3) ist es aufgrund der längeren Fahrstrecken, anspruchsvolleren Nutzlastprofilen und des höheren Kostendrucks unklar, welche Antriebsart hier sinnvoll ist und sich durchsetzen wird. Sowohl Batterie^{FZ}, Brennstoffzellen^{FZ}, E-Fuels^{FZ} als auch Oberleitung^{FZ} sind hier denkbar und werden je nach Studie als vorteilhaft gesehen. Ähnliches gilt für den straßenbasierten Verkehr im Bereich der Personenbeförderung. Während sich im urbanen Raum primär Batterie^{FZ} – Busse durchzusetzen scheinen, ist die Tendenz für den ländlichen Raum noch unklar.

Die Nutzung von Oberleitung^{FZ} hängt in der straßenbasierten Mobilität insbesondere davon ab, ob Oberleitungen vorhanden sind. Ist dies im urbanen Raum der Fall, werden diese zumeist als vorteilhaft erachtet. Im Fernverkehr ist unklar, inwieweit ein Oberleitungsausbau auf den Autobahnen kurz- bis mittelfristig realistisch erscheint. Auf der Schiene sind Oberleitung^{FZ} erprobt

und je nach Frequenz und Topografie bereits heute zu einem Fossilen^{FZ} konkurrenzfähig.

Die Zukunft von E-Fuels^{FZ} ist in der straßenbasierten Mobilität unklar. Zwar werden synthetische Kraftstoffe für den Weiterbetrieb gebräuchter Fossil^{FZ} noch benötigt werden. Gleichzeitig hat die EU ein Verbrennungsmotor-Fahrzeug Verbot für M1/N1-Neufahrzeuge ab 2035 beschlossen, bei dem unklar ist, inwieweit es E-Fuels^{FZ} umfasst (siehe Kapitel 4.2). Für Neufahrzeuge erscheint eine großskalige Verwendung von E-Fuels^{FZ} insbesondere auch aufgrund der hier gezeigten geringen Energieeffizienz (siehe Kapitel 3.1) sehr unwahrscheinlich. Die Einsatzpotentiale von E-Fuels^{FZ} werden dagegen in den Bereichen Hochseeschifffahrt sowie Langstrecken-Flug als aktuell alternativlos gesehen.

Die Prognosen über den Zeithorizont des Markthochlaufs der jeweiligen alternativen Antriebstechnologie variieren je nach Fahrzeugtyp. So hat der Markthochlauf von Batterie^{FZ} -PKWs und Batterie^{FZ} -LKWs im Regional- und Verteilverkehr bereits begonnen. Im Fernverkehr (>26 t zGG) wird der Beginn des Markthochlaufs ab 2024 gesehen, während von Oberleitung^{FZ}-LKWs für den Fernverkehr ein Markthochlauf ab 2025 und von Brennstoffzellen^{FZ}-LKWs für den Fernverkehr ab 2027 gesehen wird (NPM - AG 1 2021: 32; 75–76). Eine Wirtschaftlichkeit von Wasserstoff-Antrieben (inklusive synthetischer Kraftstoffe) wird zunächst ab Mitte der 2020er im Bereich der

Linien- und Reisebusse, Schwerlastverkehr, Müllsammelfahrzeuge, Schienenpersonennahverkehr und bei kleinen Schiffen und Fähren gesehen. Ab Ende der 2020er wird diese in einigen Studien bei Mittelklassewagen/SUVs und Lieferwagen und im Kleinwagenbereich gesehen sowie ab Anfang/Mitte der 2030er der Hochseeschifffahrt und im Luftverkehr gesehen (acatech & DECHEMA 2022: 34; Arndt 2021: 98; Hydrogen Council 2020: 10; MWVATT SH 2020: 22; NRL-Experteninterview 2022).

Der politisch gewollte Markthochlauf gerät dabei aktuell in der praktischen Umsetzung spürbar ins Stocken. So beklagen Unternehmen, die Brennstoffzellen^{FZ} beschaffen wollen, insbesondere folgende Herausforderungen:

- Verzögerte Umsetzungen von angekündigten Förderrichtlinien
- Mangelnde Verfügbarkeit von Modellen (z. B. Gelenkbusse, Abfallsammelfahrzeug-Seitenladern oder Schwerlast LKW)
- (Pandemiebedingte) Lieferschwierigkeiten von herstellenden Unternehmen
- Nachteilige Wirtschaftlichkeit/Marktreife von grünem Wasserstoff im Vergleich zu grünem Strom
- Teilweise noch fehlende rechtliche Regulierungen⁵⁰
- Fehlendes Netz von Wasserstoff-Tankstellen (insbesondere für Nutzfahrzeuge)

Eine Reaktion auf diese Hürden in der Praxis der Flottenumstellung ist, sich vorerst auf Batterie^{FZ} zu konzentrieren und zunächst die Strecken und Anwendungen umzustellen, die

mit Batterie^{FZ} sinnvoll zu bedienen sind. Das Kalkül dahinter ist zudem, dass sich durch den technologischen Fortschritt die Strecken und Anwendungen von Batterie^{FZ} stetig erweitern, sodass sich die Notwendigkeit einer Flottenergänzung durch Nicht-Batterie^{FZ} stetig weiter verkleinert. Das heißt, dass durch die Hürden die Praxis damit reagiert, den Markthochlauf von Brennstoffzellen^{FZ} vom Zeitpunkt zunehmend nach hinten zu verschieben und ggf. eine technologische Vorentscheidung zugunsten von Batterie^{FZ} zu treffen.

Perspektivisch werden sich im Rahmen des Markthochlauf von alternativen Antriebstechnologien im Verkehrssektor zahlreiche neue spezifische Geschäftsmodelle entwickeln. Diese sind insbesondere in den folgenden Bereichen zu erwarten:

- Entwicklung und Produktion von neuen alternativen Fahrzeugantriebs-, Ladestellen-, Tankstellen- & Oberleitungs-Komponenten sowie synthetischen Kraftstoffen (bspw. Umrüstung von Verbrennungsfahrzeugen, Neuentwicklung- und Produktion, Zulieferer für neue Komponenten)
- Neue Finanzierungsmodelle für Fahrzeuge und Fahrzeugkomponenten sowie Ladestellen-, Tankstellen- & Oberleitung-Infrastruktur (bspw. Kredit-, Miet-, Sharing- oder Leasingmodelle)
- Innovative Betriebskonzepte von Ladestellen-, Tankstellen- und Oberleitung-Infrastruktur
- Handel mit der THG-Minderungsquote
- Erbringung von systemdienlichen Leistungen (bspw. bidirektionales Laden)

⁵⁰ Bspw. wird die fehlende serielle Zulassung von Schwerlast-Brennstoffzellen^{FZ} kritisiert, da technisch bedingt durch die zwangsläufigen Zubauten (Wasserstofftanks) die geltenden Längenbeschränkungen um bis zu 90 cm überschritten werden. Als Folge erhalten umgerüstete Schwerlast-Brennstoffzellen^{FZ} nur eine Einzeltypenzulassung (DWV 2023: 3-4).

- Neue Recyclingverfahren für Fahrzeug- und Ladestellen-, Tankstellen- und Oberleitungs-Komponenten.

5. NRL

5.1 Potential in der NRL-Modellregion

Die Bundesregierung hat bezüglich der Ausbauziele im Klimaschutzprogramm 2030 sowie im Koalitionsvertrag der Bundesregierung Ziele bezüglich der Antriebswende beschlossen (siehe Kapitel 4.1). Überträgt man die politischen Ziele auf die NRL-Modellregion Hamburg, Schleswig-Holstein und Mecklenburg-Vorpommern, kann der zukünftige Energiebedarf für den straßenbasierten Verkehr abgeschätzt werden.

Tabelle 5 zeigt für den straßenbasierten Verkehr, dass der nationale Energiebedarf (ohne Tankverluste) insbesondere durch Strom für Batterie^{FZ} und ggf. Oberleitung^{FZ} gedeckt wird. Der Anteil von Wasserstoff im Vergleich zu Strom ist sowohl in der Modellregion als auch national mit 2,9 % (2030) bis 7 % (2045) als deutlich geringer

einzuschätzen. Für den Verkehrssektor insgesamt (inklusive der weiteren Verkehrsträger Schiene, Luft und Wasser) wird der nationale Bedarf an Wasserstoff (ohne PtL) je nach Studie und Szenario im Jahr 2030 auf 0 bis 8 % (Gesamtbedarf: 0 bis 11 TWh) und im Jahr 2045 auf 5 bis 27 % (Gesamtbedarf: 19 – 91 TWh)⁵¹ geschätzt. Zudem ist ein erhöhter Bedarf an synthetischen Kraftstoffen von 120 -184 TWh insbesondere für die Luft- und (Hochsee-) Schifffahrt zu erwarten (siehe Kapitel 4.3) (BDI 2021; Dena 2021; Prognos, Öko-Institut, & Wuppertal-Institut 2021b; Fraunhofer ISI 2021b; Kopernikus-Projekt Ariadne 2021). Dabei zeigt sich an den Unterschieden in den Bedarfseinschätzungen die hohe Unsicherheit bezüglich der Antriebswahl für die Mobilität der Zukunft.

Tabelle 5: H₂ und Strom-Bedarf des straßenbasierten Verkehrs 2030 - 2045 in der NRL-Modellregion und Deutschland⁵²

	2030 (~ 33,33 % Anteil erneuerbarer Antrieb)	2035 (~ 55,33 % Anteil erneuerbarer Antrieb)	75 % Anteil (2035 Ziel für NRL-Region)	2045 (~ 100 % Anteil erneuerbarer Antrieb)
NRL – Region	4,8 TWh Strom 4.247 t H ₂ (0,14 TWh H ₂)	8,07 TWh Strom 15.070 t H ₂ (0,5 TWh H ₂)	11,72 TWh Strom 20.516 t H ₂ (0,68 TWh H ₂)	13,99 TWh Strom 31.876 t H ₂ (0,5 TWh H ₂)
Deutschland	66,15 TWh Strom 56.056 t H ₂ (1,87 TWh H ₂)	110,96 TWh Strom 197.034 t H ₂ (6,57 TWh H ₂)	161,73 TWh Strom 268.333 t H ₂ (8,94 TWh H ₂)	190,44 TWh Strom 401.237 t H ₂ (13,27 TWh H ₂)

⁵¹ Übersicht siehe Anhang E: Tabelle Gesamtsystemische Studien: Bedarf an Strom, H₂ und PtL im Verkehrssektor 2030, 2035 & 2045.

⁵² Berechnung auf Grundlage von (UBA 2020a; KBA 2022b, 2022a; Fraunhofer ISI 2021c; Prognos, Öko-Institut, & Wuppertal-Institut 2021b; HBEFA 2022; Prognos, Öko-Institut, & Wuppertal-Institut 2021a) und eigenen Annahmen (siehe Anhang D: Tabelle Angenommene Energie-Verbräuche für verschiedene Fahrzeugklassen).

5.2 NRL-Projekte

Das Verbundprojekt Norddeutsches Reallabor (NRL) hat mit der AG 7 „Mobilität“ das Ziel, die Umsetzung und Demonstration vollständig „grüner“ Brennstoffzellen^{FZ}-Mobilität entlang der gesamten Wertschöpfungskette zu zeigen – von der Wasserstoff-Erzeugung über die Distribution bis zur Bereitstellung und Nutzung emissionsfreier Fahrzeuge.

Dazu sollen nach aktuellem Stand von den NRL-Praxispartnern 174 Brennstoffzellen^{FZ}-Fahrzeuge beschafft werden (siehe Tabelle 6). Setzt man diese 174 Brennstoffzellen^{FZ} in das Verhältnis von aktuell rund 2.140 zugelassenen Brennstoffzellen^{FZ} deutschlandweit (siehe Kapitel 3.2), dann wird deutlich, dass das NRL eine relevante Stichprobengröße an Brennstoffzellen^{FZ} aufweisen wird.

Tabelle 6: Verkehrs-Projekte im NRL

Fahrzeugtyp	Umsetzungspartner	Anzahl	Besonderheiten im Anwendungsfall
PKW	Alphabet	150 PKW und LNF	<ul style="list-style-type: none"> Leasing an Kunden mit besonderen Reichweiteanforderungen
Abfallsammelfahrzeuge	Stadtreinigung Hamburg AÖR	2 Abfallsammelfahrzeuge 2 große Kehrmaschinen	<ul style="list-style-type: none"> Täglich kurze, aber unterschiedliche Strecken mit vielen Bremsvorgängen (viel Rekuperationsenergie) zusätzliches Arbeitsaggregat zu versorgen ggf. eigene Wasserstoffproduktion
	Schweriner Abfallentsorgungs- und Straßenreinigungsgesellschaft GmbH (SAS)	3 Abfallsammelfahrzeuge	
	Entsorgungsbetriebe Lübeck	1 Abfallsammelfahrzeug	
Busse	Hamburger Hochbahn AG	5 Brennstoffzellenbusse	<ul style="list-style-type: none"> Täglich sehr ähnliche/prognostizierbare Strecken zusätzliches Volumen und Gewicht durch Antrieb weniger relevant

LKW	Volker Rumstich Transport GmbH	1 Sattelzug (40 t)	<ul style="list-style-type: none"> • zusätzliches Volumen und Gewicht durch Antrieb sehr relevant • häufig lange tägliche Strecken • CO₂-abhängige Maut als potenzieller Treiber
Gepäckschlepper	Flughafen Hamburg GmbH	10 Gepäckschlepper	<ul style="list-style-type: none"> • Anforderung gleichmäßige Geschwindigkeit • Kann Betriebsgelände Flughafen nicht verlassen

5.3 Kurz-Interview NRL AG 7 „Mobilität“-Leitung

Kurz-Interview mit Herr **Peter Lindlahr**, Geschäftsführer von hySOLUTIONS und Leiter der AG 7 „Verkehr“ im NRL.

1. Wie sehen Sie die Rolle von Wasserstoff im Sektor Verkehr?

Neben dem Einsatz von grünem Wasserstoff in den grundstoffverarbeitenden Industrien (Stahl, Kupfer, Chemie, u. a.) mit perspektivisch großen Abnahmemengen und einer Hebelwirkung für den angestrebten Markthochlauf (Skalierung und damit einhergehende Kostendegression), wird auch der Sektor Transport und Logistik einen relevanten Beitrag zum Wasserstoff-Markthochlauf und zur Dekarbonisierung des Verkehrs leisten können. Aufgrund des verzögerten herstellerseitigen Marktangebotes (Serienfahrzeuge bei H₂-Gelenkbussen frühestens Mitte 2024, serienreife Lkw der 40-t-Klasse Lkw frühestens ab Anfang 2025) stellt Wasserstoff im Transport- und Logistiksektor aus Anwendersicht aber eher noch eine strategische Option ohne konkretisierte Beschaffungsrelevanz dar.

Auf Systemebene gilt das Augenhöhe-Prinzip: grüner Wasserstoff stellt für den künftigen emissionsfreien Verkehr eine sinnvolle und gleichberechtigte Alternative zur Batterietechnologie dar, d. h. beide

Antriebsarten stehen in einem komplementären und nicht in einem konkurrenzierenden Verhältnis. Die Vorteile beim Wasserstoff liegen in den kurzen Betankungszeiten, den höheren Reichweiten und der nahezu uneingeschränkten Nutzlast. Dies ist besonders interessant für schwere Nutzfahrzeuge, sofern sie beispielsweise im Mehrschichtbetrieb ohne nennenswerte Standzeiten (Recharge Möglichkeiten) eingesetzt werden.

2. Wo sehen Sie die größten Hürden für die Defossilisierung vom Sektor Verkehr?

Es gibt eine ganze Reihe von Herausforderungen, die es zu lösen gilt und die aber auch lösbar sind, insofern perspektivisch also keine dauerhaften Hürden darstellen. Gegenwärtig ist sicherlich die Verfügbarkeit erneuerbarer Energien zur Umwandlung in grünen Wasserstoff eine der größten Herausforderungen. Es ist hierbei ungemein wichtig, die Bedarfe für grünen Wasserstoff als „big picture“ zu begreifen und nicht einzelne Anwendungen gegeneinander auszuspielen (beispielsweise Industrie vs. Verkehr).

Eine weitere Herausforderung ist wie bei nahezu allen early-market Situationen die Höhe der Betriebskosten. Bei Wasserstoffmobilität betrifft dies sowohl die

trotz staatlicher Förderung weiterhin hohen Leasingkosten für die Fahrzeuge als auch die derzeit (noch zu) hohen Wasserstoffkosten. Hierbei ist besonders prekär, dass economies of scale, also eine Kostendegression über Menge und Skaleneffekte, nicht eintreten werden, solange das Fahrzeugangebot nicht breiter und attraktiver wird. Wir haben hier offensichtlich immer noch ein Henne-Ei-Problem, von dem wir ja glaubten, dies eigentlich längst überwunden zu haben.

Eine Überwindung dieses Dilemmas über politische Lösungen ist alternativlos, solange es noch keine robusten Marktmechanismen gibt. Die Forderung an die Bundesregierung ist deshalb, keine halben Sachen zu machen und das jüngst auf den Weg gebrachte Konzept, bei energieintensiven Industrieunternehmen durch sogenannte Klimaschutzverträge einen bestimmten Anteil der Wasserstoffkosten auszugleichen (Carbon Contracts for Difference/CCfD), nicht auf die Industrie zu beschränken, sondern auch für den Sektor Transport und Logistik zur Anwendung zu bringen.

Dringender Nachholbedarf besteht auch hinsichtlich der Ausweitung der an den öffentlichen Wasserstoff-Tankstellen verfügbaren Druckstufen. Es ist unschwer erkennbar, dass künftig den schweren

Fahrzeugen, also Trucks und Bussen, die mit 350 bar betankt werden müssen, eine führende Rolle zukommen wird. Die Auslegung vieler Bestandstankstellen ist jedoch auf die für PKW relevante Druckstufe 700 bar beschränkt. Auch hier gibt es also noch viel zu tun.

3. Wo sehen Sie die größten Chancen für neue Geschäftsmodelle im Sektor Verkehr?

Vor dem Hintergrund der investiven Mehrkosten im Vergleich von Wasserstoff- zu Batteriefahrzeugen - und erst recht zu Dieselfahrzeugen - stellen nutzungsbezogene Kontrakte ein attraktives Geschäftsmodell dar. Diese „Pay-per-Use“ Konzepte, bei denen dem Flottenbetreiber nur die tatsächlich gefahrenen Kilometer zu einem zuvor verabredeten Fix-Preis berechnet werden, erlauben ein hohes Maß an betrieblicher und finanzieller Flexibilität. Es handelt sich aus Anwendersicht nicht um Investitionskosten, sondern ausschließlich um operative Aufwände. Der Fahrzeugnutzer ist hierbei nicht auf ein einzelnes Fahrzeug eines bestimmten Modells und Herstellers festgelegt, sondern kann auf ein herstellerübergreifend variierendes Angebot zurückgreifen. Prädikat: anwenderfreundlich und richtungsweisend. Was will man mehr?

5.4 Anwendungsbeispiel Abfallsammelfahrzeug

Ein Beispiel für die unklare zukünftige Antriebstechnologie sind Abfallsammelfahrzeuge (ASF) (Fahrzeugklasse N3). In der Praxis setzen die anwendenden Unternehmen auf unterschiedliche alternative Antriebstechnologien. Deswegen wurden im Rahmen von Experteninterviews und einer Masterarbeit (Heybrock 2022) verschiedene Entsorgungsfachbetriebe in der NRL-Modellregion und darüber hinaus qualitative Untersuchungen zur Bewertung und Wahl

von Antrieben für ASF durchgeführt. Dabei standen insbesondere die beiden Antriebstechnologien rein batterieelektrisch (Batterie^{FZ}-AFS) und batterieelektrisch mit Wasserstoff als Reichweitenverlängerung (Brennstoffzellen^{FZ}-AFS) zur Diskussion. Die wesentlichen Ergebnisse werden nachfolgend dargelegt:

Gegenüber einem Fossilien^{FZ}-ASF werden bei der Nutzung eines Brennstoffzellen^{FZ}-AFS oder Batterie^{FZ}-AFS größere ökonomische Einsparungen insbesondere im Bereich der

Reparatur- und Wartungskosten mit bis zu 50 % Kostenreduktion erwartet. Der deutlich höhere Anschaffungspreis eines ASF mit alternativem Antrieb kann aktuell mit Hilfe der Förderprogramme annähernd auf das Niveau des Anschaffungspreises eines Fossilen^{FZ}-ASF gesenkt werden (siehe auch CAPEX Kapitel 4.2). Für ASF spielt Rekuperationsenergie durch die vielen Bremsvorgängen in der Anwendung eine größere Rolle. Diese können die Brennstoffzellen^{FZ}-AFS und Batterie^{FZ}-AFS im Gegensatz zu einem Fossilen^{FZ}-ASF aufnehmen. Zudem werden die reduzierten Lärm- und Luftemissionen bei einem Brennstoffzellen^{FZ}-AFS und einem Batterie^{FZ}-AFS im Vergleich zu einem Fossilen^{FZ}-ASF im Betrieb für Mitarbeitende und Anwohnende hervorgehoben. Die Fahrzeugverfügbarkeit von Fossilen^{FZ}-ASF ist gegeben, während für Brennstoffzellen^{FZ}-AFS und Batterie^{FZ}-AFS Mitte der 2020er eine Markt- und Serienreife der Fahrzeugtechnologie erwartet wird, bei der die ASF sowohl ökonomisch als auch technisch (Wetter- und Temperaturtauglichkeit robust) sind.

Bei einem Vergleich eines Brennstoffzellen^{FZ}-AFS mit einem Batterie^{FZ}-AFS sind zunächst die technischen Anforderungen wie beispielsweise einer Mindestreichweite/Mindestbetriebsstunden zahl je Tour (75-100 km) oder einer Mindestnutzlast (rund 10.500 kg) wichtig. Hier ist in der Regel ein Brennstoffzellen^{FZ}-AFS gegenüber einem Batterie^{FZ}-AFS aufgrund der höheren volumetrischen und gravimetrischen Dichte im Vorteil. In Bezug auf die operativen Kosten ist ein Batterie^{FZ}-AFS hingegen im Vorteil, weil es mit geringeren Energiekosten zu betreiben ist (siehe auch OPEX in Kapitel 4.2).

Neben den technischen Anforderungen ist insbesondere der Ausbaustand der Infrastruktur entscheidend. Einige der

befragten Unternehmen können den Wasserstoff bereits über externe Tankstellen beziehen, wodurch sie nicht selbst in den Ausbau der Infrastruktur investieren müssen und damit die Kosten für den Bau einer (Betriebs-) Tankstelle vermeiden können (Kosten rund 1,8 Millionen €). Dementsprechend besteht ein Henne-Ei-Problem für die Unternehmen, die (noch) nicht auf eine externe Infrastruktur zurückgreifen können oder deren Bedarf extern nicht gedeckt werden kann. Ein Unterschied zum Batterie^{FZ}-AFS liegt darin, dass sämtliche Unternehmen bei der Beschaffung eines Batterie^{FZ}-AFS auch in eine eigene Ladeinfrastruktur investieren müssen, da es für schwere Nutzlastfahrzeuge (SNF) keinerlei öffentliche Batterie-Ladeinfrastruktur gibt. Sofern also Wasserstoff extern bezogen werden kann, kann dies ein entscheidender Punkt bei der Wahl des Antriebs darstellen.

Des Weiteren besteht ein Unterschied zwischen ländlichen und dicht besiedelten, urbanen Regionen: Während in ländlicheren Regionen eher hohe Reichweiten eine wichtige Anforderung sind, ist bei dicht besiedelten Einzugsgebieten die gesamte Menge der im Fahrzeug zur Verfügung stehender Energie von größerer Bedeutung. Denn zum einen kann das Tourenprofil in großen Städten sehr unterschiedlich sein, wodurch flexible Einsatzmöglichkeiten der Fahrzeuge gefordert sind. Zum anderen steht die Tourenlänge in Abhängigkeit zum Abfallaufkommen. Dementsprechend kann eine Tour in Bezug auf die Kilometerlänge kurz sein, doch wird dann umso mehr Energie für die Aufbauarbeiten benötigt, da die Einwohnerdichte höher ist und damit die Abfallsammlung auf kürzerer Strecke passiert. Grundsätzlich bewerteten die Unternehmen das Batterie^{FZ}-ASF bei diesen technischen Anforderungen etwas schlechter.

Insgesamt zeigt sich, dass viele Entsorgungsfachbetriebe mit Hilfe der Förderung bereits in alternativ betriebene ASF investiert haben oder dies planen. Motivation hierfür ist zumeist die Positionierung des eigenen Unternehmens als verantwortungsvoller Vorreiter für die Antriebswende sowie die Umsetzung der politisch-rechtlichen Rahmenbedingungen wie insbesondere der Clean Vehicle Directive (siehe Kapitel 4.1). Mit der Anschaffung einzelner ASF mit alternativem Antrieb sollen zunächst möglichst viele praktische Erfahrungen gesammelt, sich miteinander ausgetauscht und die Mitarbeitenden frühzeitig mitgenommen werden. Eine komplette Flottenumstellung auf alternative Antriebe ist dann in der Regel bis Mitte der 2030er Jahre geplant.

In Hinblick auf die aktuelle Energiekrise und die Auswirkungen der Pandemie sind die Abschätzungen von Kosten, Lieferzeiten und weiteren Entwicklungen schwierig, sodass zum Teil noch viel Unsicherheit bezüglich der zu favorisierenden Antriebstechnologien herrscht. Des Weiteren werden neben Batterie^{FZ}-AFS und Brennstoffzellen^{FZ}-AFS auch E-Fuels^{FZ}-AFS als mögliche Alternative

nicht ausgeschlossen, dessen technologischer Fortschritt es ebenfalls zu beobachten gilt. Die Unternehmen sind sich einig, dass sich langfristig die Technologie durchsetzen wird, die alle Anforderungen zu den bestmöglichen Konditionen insbesondere in Bezug auf die preislichen Entwicklungen erfüllt. Dabei ist wichtig, dass diese Technologie auch in ausreichender Menge verfügbar sein wird, da derzeit das Marktangebot noch überschaubar ist.

Zu betonen ist schließlich, dass die Antriebswahl und damit der Markthochlauf auch entscheidend von dem Faktor Mensch und die subjektive Einschätzung der Unternehmen abhängt. So wurde in den Befragungen deutlich, dass allgemein der Wissenstand zu den verschiedenen alternativen Antriebstechnologien unterschiedlich ist, zudem wurden die verschiedenen Antriebstechnologien unterschiedlich eingeschätzt sowie aus den gleichen Einschätzungen unterschiedliche Schlüsse gezogen. So kommt es in ähnlichen Ausgangssituation in den Unternehmen zu unterschiedlicher Bewertung in der ASF-Antriebsfrage.

6. Fazit: Grüner Wasserstoff im Verkehrssektor

Der nationale politische Rahmen sieht im Bereich der straßenbasierten Mobilität eine Umstellung von Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor auf fossiler Basis (Fossile^{FZ}) hin zu alternativen Antrieben bis 2030 von rund einem Drittel aller Fahrzeuge und bis 2045 von sämtlichen Fahrzeugen vor.

In der straßenbasierten Mobilität kann Wasserstoff als Gas oder als Flüssigkeit in einem Elektromotor mit Brennstoffzelle oder einem Verbrennungsmotor genutzt werden. Zudem kann Wasserstoff als synthetischer Kraftstoff in einem mit Verbrennungsmotor angetriebenem Fahrzeug (E-Fuels^{FZ}) eingesetzt werden. Der Schwerpunkt der Wasserstoff-Mobilität liegt dabei aktuell auf gasförmigem Wasserstoff für einen Elektromotor in Kombination mit einer Brennstoffzelle (Brennstoffzellen^{FZ}). Gleichzeitig gibt es im Verkehrssektor mit batterieelektrisch-betriebenen Fahrzeugen (Batterie^{FZ}) und oberleitungsbetriebenen Fahrzeugen (Oberleitung^{FZ}) eine durch einen höheren Wirkungsgrad gekennzeichnete, energieeffizientere Alternative zu einem Brennstoffzellen^{FZ}.

Aus ökonomischer Perspektive ist zudem davon auszugehen, dass lokal produzierter grüner Strom immer kostengünstiger sein wird als der über einen Elektrolyseur lokal produzierte grüne Wasserstoff. Grüner Wasserstoff kann nur günstiger sein, wenn Strom im Überfluss produziert wird und die ansonsten abgeregelt Energie für die Elektrolyse genutzt wird. Eine Alternative wäre, dass in einer anderen Region auf der Welt Strom deutlich kostengünstiger als im lokalen Netz erzeugt wird und diese Energie

dann, gespeichert in Wasserstoff oder einem Derivat von diesem, in das lokale Energienetz transportiert wird. Inwieweit dies in einem großen Maßstab möglich sein wird, ist derzeit noch unklar (siehe auch Studienreihe Teil 1: Grüner Wasserstoff als Markt der Zukunft).

Vor diesem Hintergrund lassen die Erkenntnisse und Ergebnisse dieser Potentialstudie den Schluss zu, dass perspektivisch in der Antriebswende aus Effizienzgründen auf Batterie^{FZ} als erste Wahl gesetzt werden sollte. Gerade in den leichten Fahrzeugklassen wie Personenkraftwagen (PKW) und leichte Nutzfahrzeuge (LNF) gibt es zunehmend mengen-, segment- und modellmäßig ein zunehmendes Angebot an Batterie^{FZ} zu marktgängigen Preisen, die sowohl in Anschaffung als auch im Betrieb im Vergleich zu einem Fossilen^{FZ} bereits wirtschaftlich sind. Zudem ist die Batterie^{FZ}-Infrastruktur weiter ausgebaut als die Brennstoffzellen^{FZ}-Infrastruktur. In den leichten Fahrzeugklassen findet also bereits ein Batterie^{FZ}-Markthochlauf mit entsprechenden Skaleneffekten statt, der für Brennstoffzellen^{FZ} nur schwer aufholbar sein wird. Denn sowohl das Brennstoffzellen^{FZ}-Angebot ist derzeit hier noch sehr begrenzt (insbesondere durch die COVID-19 Pandemie, global gestörte Lieferketten, hohe Energiepreise und drohende Rezession) als auch die Brennstoffzellen^{FZ}-Nachfrage, nicht zuletzt durch die vergleichsweise hohen Anschaffungs- und Betriebskosten. Eine Vorentscheidung in den leichten Fahrzeugklassen zugunsten der Batterie^{FZ} scheint insofern bereits gefallen zu sein.⁵³

⁵³ Dabei scheinen hier wissenschaftlich-ökonomische Erkenntnisse nicht den tatsächlichen Konsumbedürfnissen der breiten Gesellschaft zu entsprechen. So zeigt die NRL-Gesellschaftsstudie, dass unter gleichen Infrastrukturbedingungen 48 % der Bevölkerung in der NRL-Projektregion „voll und ganz“ einen Brennstoffzellen^{FZ}-PKW einem Batterie^{FZ}-PKW vorziehen würden, während nur 14 % diesem „überhaupt nicht“ zustimmen würden (Arndt 2022: 47). Beim nächsten Fahrzeug-Kauf würden 19 % einen Brennstoffzellen^{FZ}-PKW in Erwägung ziehen und nur 17 % einen Batterie^{FZ}-PKW (Arndt 2022: 21).

Gleichzeitig haben die für Batterie^{FZ} in größerer Dimensionierung benötigten Batterien eine deutlich geringere gravimetrische und geringere volumetrische Dichte und längere Ladedauer. Daher kann die Anwendung von Wasserstoff insbesondere in zeit-, gewichts- und/oder volumensensiblen Anwendungsbereichen sinnvoll sein bzw. im Einzelfall weitgehend alternativlos sein. Diese für Wasserstoff sinnvollen Anwendungspotentiale in der straßenbasierten Mobilität werden dabei insbesondere im Schwerlastverkehr gesehen oder im Bereich von Fahrzeugen mit zusätzlichem Arbeitsaggregat (bspw. Abfallsammelfahrzeuge oder Kühllastwagen). Dass sich ein Brennstoffzellen^{FZ} bzw. ein E-Fuels^{FZ} hier als alleinige Antriebsoption gegen ein Batterie^{FZ} oder ein Oberleitung^{FZ} durchsetzen wird, ist dabei aktuell jedoch nicht absehbar, denkbar ist in der Flottenumstellung auch statt der Entscheidung für eine Antriebstechnologie die Flottenergänzung durch Brennstoffzellen^{FZ} oder E-Fuels^{FZ}. Zudem ist in den leichten Fahrzeugklassen in Nischenanwendung bei geringen Standzeiten und häufigen Fernfahrten oder Off-Road Anwendung ohne Betankungs-Infrastruktur ggf. ein Brennstoffzellen^{FZ} als vorteilhafte Ergänzung denkbar (siehe Kapitel 3.2).

Vor diesem Hintergrund des bereits festgelegten Schwerpunkts der leichten Fahrzeugklassen auf Batterie^{FZ} und den für eine energieeffiziente Energiewende problematischen Effizienzeinbußen von Brennstoffzellen^{FZ} kommt diese Studie zu dem Schluss, dass sich der Brennstoffzellen^{FZ}-Markthochlauf auf die Anwendungen konzentrieren sollte, in denen eine Batterie^{FZ}-Anwendung mit deutlichen Nutzen-Einbußen einhergeht. Insgesamt gilt für die straßenbasierte Mobilität, dass eine Wasserstoffanwendung eher in einer

Brennstoffzelle anstatt als synthetischer Kraftstoff in einem Verbrennungsmotor realistisch erscheint, da E-Fuels^{FZ} zumindest im urbanen Bereich aufgrund der weiteren Luftschadstoffe von den kommunalen Akteuren meist nicht als mögliche Lösung gesehen werden und der Wirkungsgrad von synthetischen Kraftstoffen im Vergleich zu grünem Wasserstoff auch noch einmal deutlich verringert ist. Ggf. könnte die Nutzung von grünem Wasserstoff in einem Verbrennungsmotor im Schwerlastbereich interessant sein, da bei der Verbrennung geringere Reinheitsansprüche an den grünen Wasserstoff gestellt werden können als bei der Nutzung in der Brennstoffzelle.

Um in diesem Anwendungsbereich bezüglich der Energiekosten konkurrenzfähig zu sein, dürfte der Wasserstoff bei den aktuellen Strompreisen²⁰²³ ohne USt. maximal rund 4 €/kg H₂ (Industriekunde²⁰²³ mit Strompreis von 0,19€/kWh), 5,20 € (Gewerbekunde²⁰²³ mit Strompreis von 0,24 €/kWh) bis 7,50 €/kg H₂ (Gewerbekunde²⁰²³ unter 30.000 kWh/Strom Jahr mit Strompreis von 0,34 €/kWh) kosten – statt aktuell 10,80 €/kg (350 bar Tankstelle) (siehe Kapitel 4.2.1). Das umweltökonomische Instrument der THG-Minderungsquote bietet dabei perspektivisch Zusatzerlöse für grünen Wasserstoff von bis zu 9 €/kg H₂. Da die THG-Minderungsquote auch für Strom gilt, ist davon auszugehen, dass durch die THG-Minderungsquote alternative Antriebe allgemein gegenüber fossilen Antrieben wirtschaftlicher werden, sich das Verhältnis zwischen Wasserstoff und Strom aber nicht verändern wird (siehe Kapitel 4.2.3).

Bezüglich der Infrastruktur heißt eine Konzentration auf schwere Nutzfahrzeuge, dass der Ausbau einer (europaweiten) Wasserstoff-Tankstellen-Infrastruktur für den Schwerlastverkehr (zumeist 350 bar) gegenüber dem 700-bar Tankstellen-Netz-

Ausbau (leichte Fahrzeugklassen) zu priorisieren ist, um eine flächendeckend bedarfsgerechte, nutzungsfreundliche und wirtschaftliche Betankungsinfrastruktur für den Brennstoffzellen^{FZ}-Markthochlauf im Schwerlastverkehr bereitstellen zu können. Leicht zugängliche öffentliche 350-bar Tankstellen können dabei den ökonomischen Vorteil haben, dass sie im Vergleich zum notwendigen Aufbau einer Ladeinfrastruktur für Batterie^{FZ} infrastrukturemäßig für Unternehmer der kostengünstigste Einstieg in die Antriebswende sind. Dagegen erscheint der flächendeckende Ausbau der 700-bar Tankstellen im weltweiten Vergleich mit allgemein 13 % der Tankstellen bei 3 % der weltweiten Brennstoffzellen^{FZ}-Flotte in Deutschland und somit einer Quote von nur rund 12 Brennstoffzellen^{FZ}-PKW pro öffentlicher 700-bar-Tankstelle⁵⁴ sowie aufgrund des Fokus der leichten Fahrzeugklassen auf Batterie^{FZ} als tendenziell ausreichend und nicht zu priorisieren.

Eine Konzentration auf spezielle Fahrzeugklassen könnte auch den Brennstoffzellen^{FZ}-Markthochlauf vielleicht sogar erleichtern. So können Mittel und Ressourcen in der Fahrzeug-Entwicklung auf spezielle vorteilhafte Anwendungsfälle und Modelle konzentriert werden, allgemeine Lieferschwierigkeiten und fehlende Wirtschaftlichkeit durch konzentrierte Skaleneffekte verbessert und spezifische Infrastruktur und Rahmenbedingungen (bspw. 350-bar Tankstellen oder fehlende rechtliche Regulierungen) gezielter umgesetzt werden. Die nachteilige Wirtschaftlichkeit bzw. Marktreife von grünem Wasserstoff im Vergleich zu fossilen Kraftstoffen kommt folglich nur in gesamtsystemisch sinnvollen Anwendungsbereichen zum Tragen und die nachteilige Wirtschaftlichkeit kann somit

kosteneffizient durch bspw. gezielte CCfD-Konzepte zur Senkung der Betriebskosten in politisch gewollten Anwendungsbereichen reduziert werden.

Insgesamt wird Wasserstoff in der straßenbasierten Mobilität sowohl in der NRL-Modellregion als auch bundesweit mit rund 7 % des Energiebedarfs zwar eine relevante, aber eher untergeordnete Rolle spielen (siehe Kapitel 5.1). Dies ist vor dem Hintergrund der Knappheit von grünem Wasserstoff und des Vorhandenseins der energieeffizienteren Lösung Batterie^{FZ} und Oberleitung^{FZ} auch sinnvoll.

Als synthetischer Kraftstoff in einem E-Fuels^{FZ} werden die Wasserstoff-Potentiale insbesondere in dem Langstrecken-Flugverkehr und der Hochseeschifffahrt gesehen. Da die NRL-Modellregion weite Teile der nationalen Küste abdeckt, ist mit der Hochseeschifffahrt hier ggf. eine im nationalen Vergleich überproportionale Nachfrage nach grünem Wasserstoff für den Verkehrssektor denkbar.

Bezüglich der Nutzung von konfliktären Rohstoffen erscheinen Brennstoffzellen^{FZ} aufgrund der kleineren Batterie etwas vorteilhafter gegenüber einer Batterie^{FZ}. In jedem Fall drohen mit Blick auf die Antriebswende aber neue Rohstoff-Abhängigkeiten bezüglich der konfliktären Rohstoffe, die häufig nur aus wenigen Ländern importiert werden (können) und somit ein potenzieller Risikofaktor für die Versorgungssicherheit sein können (siehe Kapitel 3).

Abschließend sei betont, dass im Sinne einer ganzheitlichen Verkehrswende bis 2045 und vor dem Hintergrund der problematischen Nutzung von konfliktären Rohstoffen für alle alternative Antriebstechnologien die *Antriebswende* nur eine Teillösung für die

⁵⁴ 1.990 Brennstoffzellen^{FZ}-PKW / 163 700-bar Tankstellen = 12,21 Brennstoffzellen^{FZ}-PKW pro 700-bar Tankstelle

Defossilisierung des Verkehrssektors leistet.
Ziel sollte es sein, stets auch eine *Mobilitäts-*
und *Verkehrsträgerwende* mitzudenken
(siehe Kapitel 2).

I. Tabellenverzeichnis

TABELLE 1: ROHSTOFFBEDARF EINES BATTERIE ^{FZ} /BRENNSTOFFZELLEN ^{FZ} /OBERLEITUNG ^{FZ} - PKW	16
TABELLE 2: VERGLEICH DER UMWELTÖKONOMISCHEN INSTRUMENTE EU-ETS, CO ₂ -BEPREISUNG UND THG-MINDERUNGSQUOTE	25
TABELLE 3: MEHRKOSTEN BENZIN UND DIESEL DURCH CO ₂ -BEPREISUNG UND THG-MINDERUNGSQUOTE 2023 BIS 2030	31
TABELLE 4: ANTRIEBSVARIANTEN IN DEN VERSCHIEDENEN FAHRZEUGKLASSEN.....	36
TABELLE 5: H ₂ UND STROM-BEDARF DES STRAßENBASIERTEN VERKEHRS 2030 - 2045 IN DER NRL-MODELLREGION UND DEUTSCHLAND.....	40
TABELLE 6: VERKEHRS-PROJEKTE IM NRL	41

II. Abbildungsverzeichnis

ABBILDUNG 1: TREIBHAUSGASEMISSIONEN DER EINZELNEN SEKTOREN SEIT 1990 MIT ZIELEN BIS 2045.....	1
ABBILDUNG 2: NRL-STRUKTUR.....	2
ABBILDUNG 3: NRL-PROJEKTPARTNER	3
ABBILDUNG 4: ENTWICKLUNG ANTEIL ERNEUERBARER ENERGIEN IN DEN VERSCHIEDENEN SEKTOREN VON 2000 BIS 2021	4
ABBILDUNG 5: SCHEMATISCHER AUFBAU DER VERSCHIEDENEN ANTRIEBSTECHNOLOGIEN BATTERIE ^{FZ} , BRENNSTOFFZELLEN ^{FZ} , E-FUELS ^{FZ} UND OBERLEITUNG ^{FZ}	6
ABBILDUNG 6: ENERGETISCHER GESAMTWIRKUNGSGRAD VERSCHIEDENER ANTRIEBSOPTIONEN.....	8
ABBILDUNG 7: VERGLEICH DER GRAVIMETRISCHEN UND VOLUMETRISCHE DICHTEN VON WASSERSTOFF, DIESEL UND LITHIUM-BATTERIE	12
ABBILDUNG 8: KOSTEN DER ENERGIE INKLUSIVE ANTRIEBSEFFIZIENZ IN €/ANTRIEBS-KWH - PRIVATER ANWENDUNGSBEREICH.....	23
ABBILDUNG 9: KOSTEN DER ENERGIE INKLUSIVE ANTRIEBSEFFIZIENZ IN €/ANTRIEB-KWH- GEWERBLICHER ANWENDUNGSBEREICH (OHNE UST.).....	24
ABBILDUNG 10: ENTWICKLUNG DER THG-MINDERUNGSQUOTE 2015 - 2030.....	32
ABBILDUNG 11: FALL A: ERLÖS ÜBER DIE THG-MINDERUNGSQUOTE (450 €/t CO ₂ -ÄQ) FÜR ÖFFENTLICH ZUGÄNGLICHE LADE-/BETANKUNGSINFRASTRUKTUR IN €/KWH.....	33
ABBILDUNG 12: FALL B: ERLÖS ÜBER DIE THG-MINDERUNGSQUOTE (450 €/t CO ₂ -ÄQ) FÜR FAHRZEUGBESITZENDE IN €/FAHRZEUG	34

III. Abkürzungsverzeichnis

€	Euro
AC	Alternating Current (Wechselstrom)
Äq	Äquivalente
ASF	Abfallsammelfahrzeug
Batterie ^{FZ}	Fahrzeug, das batterieelektrisch betrieben wird, in der Literatur auch BEV (battery electric vehicle) genannt
BEHG	Brennstoffemissionshandelsgesetz
BImSchG	Bundesimmissionsschutzgesetz
BImSchV	Bundesimmissionsschutzverordnung
BMDV	Bundesministerium für Digitales und Verkehr
BMUV	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz
BMWi	Bundesministerium für Wirtschaft und Energie
BMWK	Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz
Brennstoffzellen ^{FZ}	Fahrzeug, das brennstoffzellenelektrisch betrieben wird, in der Literatur auch FCEV (fuel cell electric vehicle) genannt
CAPEX	Capital Expenditure (Investitionsausgaben)
CCfd	Carbon Contracts for difference (Differenzkontrakt)
CH ₄	Methan
CO ₂ -Bepreisung	Nationale Emissionshandel nach BEHG
CO ₂	Kohlenstoffdioxid
COVID-19	Coronavirus Disease 2019 (Coronavirus-Krankheit-2019)
DAC	Direct Air Capture (Direktabscheidung aus der Luft)
DC	Direct Current (Gleichstrom)
E-Fuels ^{FZ}	Fahrzeug, das mit einem Verbrennungsmotor auf synthetischer Kraftstoff-Basis angetrieben wird, in der Literatur wird ein allgemeines Verbrennungsmotor-Fahrzeug auch ICEV (internal combustion engine vehicle) genannt
EBeV 2022	Emissionsberichterstattungsverordnung 2022
EEG	Erneuerbare-Energien-Gesetz
EU-ETS	European Union Emissions Trading System (EU-Emissionshandel)
EU	Europäische Union
Fossil ^{FZ}	Fahrzeug, das mit einem Verbrennungsmotor auf fossiler Kraftstoff-Basis angetrieben wird, in der Literatur wird ein allgemeines Verbrennungsmotor-Fahrzeug auch ICEV (internal combustion engine vehicle) genannt
H ₂	Wasserstoff
KBA	Kraftfahrtbundesamt
KFZ	Kraftfahrzeug
kg	Kilogramm
km	Kilometer
KSG	Bundes-Klimaschutzgesetz
KTF	Klima- und Transformationsfonds

KUEBL	europäischen Klima-, Umwelt- und Energiebeihilfeleitlinien
kWh	Kilo-Watt-Stunden
LKW	Lastkraftwagen
LNF	Leichtes Nutzfahrzeug
M1	Fahrzeug zur Personenbeförderung mit höchstens acht Sitzplätzen außer dem Fahrersitz
M2	Fahrzeug zur Personenbeförderung mit mehr als acht Sitzplätzen außer dem Fahrersitz und einer zulässigen Gesamtmasse bis zu 5 Tonnen
M3	Fahrzeug zur Personenbeförderung mit mehr als acht Sitzplätzen außer dem Fahrersitz und einer zulässigen Gesamtmasse von mehr als 5 Tonnen
Mio.	Millionen
Mrd.	Milliarden
N1	Fahrzeug zur Güterbeförderung mit einer zulässigen Gesamtmasse bis zu 3,5 Tonnen
N2	Fahrzeug zur Güterbeförderung mit einer zulässigen Gesamtmasse von mehr als 3,5 Tonnen bis zu 12 Tonnen
N3	Fahrzeug zur Güterbeförderung mit einer zulässigen Gesamtmasse von mehr als 12 Tonnen
NO _x	Stickstoffoxide
NRL	Norddeutsches Reallabor
Oberleitung ^{FZ}	Fahrzeug, das per Oberleitung betrieben wird
OPEX	Operating Expenses (Betriebsausgaben)
ÖPNV	Öffentlicher Personennahverkehr
PKW	Personenkraftwagen
PtL	Power-to-Liquid (Energie zu Flüssigkeit)
PtX	Power-to-X (Energie zu X)
PV	Photovoltaik
RED II	Erneuerbare-Energien-Richtlinie (EU 2018/2001) (Renewable Energy Directive)
RED III	im FitFor55 angekündigte Anpassung der Erneuerbare-Energien-Richtlinie (Renewable Energy Directive)
SaubFahrzeugBeschG	Gesetz über die Beschaffung sauberer Straßenfahrzeuge
SNF	Schweres Nutzfahrzeug
StromPBG	Strompreisbremsegesetz
t	Tonne
TEHG	Treibhausgas-Emissionshandelsgesetz
THG	Minderungsquote Treibhausgasminderungsquote nach § 37 a-c BImSchG
THG	Treibhausgas
TWh	Terra-Watt-Stunde
USt.	Unternehmenssteuer
zGG	zulässiges Gesamtgewicht

IV. Literaturverzeichnis

- acatech; DECHEMA (2022): Wasserstoff im Mobilitätssektor. Wasserstoff-Kompass. Deutsche Akademie der Technikwissenschaften (acatech); Gesellschaft für Chemische Technik und Biotechnologie e.V. (DECHEMA). https://www.wasserstoff-kompass.de/fileadmin/user_upload/img/news-und-media/dokumente/Meta-Analyse_Mobilitaet.pdf.
- acatech; Leopoldina; Akademienunion (2017): Sektorkopplung – Optionen für die nächste Phase der Energiewende. S. 90. <https://www.acatech.de/publikation/sektorkopplung-optionen-fuer-die-naechste-phase-der-energiewende/download-pdf?lang=de>.
- ADAC (2022): Ladestationen für Elektroautos: Das kostet der Strom. Stand Oktober 2022. Allgemeine Deutsche Automobil-Club e.V. (ADAC). <https://www.adac.de/rund-ums-fahrzeug/elektromobilitaet/laden/elektroauto-ladesaehlen-strompreise/>.
- ADAC (2023): EU-Parlament: 2035 kommt das Verbrenner-Verbot. Das sind die Folgen. Allgemeine Deutsche Automobil-Club e.V. (ADAC). <https://www.adac.de/news/aus-fuer-verbrenner-ab-2035/>.
- Agora Energiewende; Agora Verkehrswende; Frontier Economics (2018): Die zukünftigen Kosten strombasierter synthetischer Brennstoffe. https://static.agora-energiewende.de/fileadmin/Projekte/2017/SynKost_2050/Agora_SynCost-Studie_WEB.pdf.
- Agora Energiewende; Guidehouse (2021): Making Renewable Hydrogen Cost-Competitive: Policy Instruments for Supporting Green H₂. Berlin. S. 96. https://static.agora-energiewende.de/fileadmin/Projekte/2020/2020_11_EU_H2-Instruments/A-EW_223_H2-Instruments_WEB.pdf.
- Agora Energiewende; Öko-Institut (2018): Vom Wasserbett zur Badewanne. Die Auswirkungen der EU-Emissionshandelsreform 2018 auf CO₂-Preis, Kohleausstieg und den Ausbau der Erneuerbaren. https://www.agora-energiewende.de/fileadmin/Projekte/2018/Reform_des_Europaeischen_Emissionshandels_2018/Agora_Energiewende_Vom_Wasserbett_zur_Badewanne_WEB.pdf.
- Agora Verkehrswende (2019a): Klimabilanz von Elektroautos. Berlin. S. 72. https://www.agora-verkehrswende.de/fileadmin/Projekte/2018/Klimabilanz_von_Elektroautos/Agora-Verkehrswende_22_Klimabilanz-von-Elektroautos_WEB.pdf.
- Agora Verkehrswende (2019b): Klimabilanz von strombasierten Antrieben und Kraftstoffen. Berlin. S. 56. https://www.agora-verkehrswende.de/fileadmin/Projekte/2019/Klimabilanz_Batteriefahrzeugen/32_Klimabilanz_strombasierten_Antrieben_Kraftstoffen_WEB.pdf.
- Agora Verkehrswende (2020): Technologieneutralität im Kontext der Verkehrswende. Kritische Beleuchtung eines Postulats. Berlin. S. 170. https://www.agora-verkehrswende.de/fileadmin/Projekte/2019/Technologieneutralitaet/33_Technologieneutralitaet_LANGFASSUNG_WEB_20-04-20.pdf.
- Agora Verkehrswende (2022): Elektro-LKW schneller auf die Straße bringen. Berlin. https://www.agora-verkehrswende.de/fileadmin/Veranstaltungen/2022/Elektrische-Lkw/Elektro-Lkw_Agora-Schlussfolgerungen_20221012.pdf.

- Arndt, Pia (2022): TRANSFORMATION & GESELLSCHAFT: Ein Stimmungsbild – Studie zur Energiewende und der Akzeptanz von Wasserstoff. Repräsentative Online-Erhebung 2022. <https://norddeutsches-reallabor.de/presse/#>.
- Arndt, Tabea (2021): Wasserstofftechnologie und Fahrzeuge. Mit Wasserstoff zur Klimaneutralität – von der Forschung in die Anwendung. S. 97–99. https://www.fvee.de/wp-content/uploads/2022/07/th2021_fvee.pdf.
- Bach, Stefan; Isaak, Niklas; Kemfert, Claudia; Kunert, Uwe; Schill, Wolf-Peter; Schmalz, Sophie et al. (2019): CO₂-Bepreisung im Wärme- und Verkehrssektor Diskussion von Wirkungen und alternativen Entlastungsoptionen: Endbericht des gleichnamigen Forschungsvorhabens im Auftrag des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMU). Berlin: DIW Berlin, Deutsches Institut für Wirtschaftsforschung. https://www.diw.de/documents/publikationen/73/diw_01.c.676034.de/diwkompakt_2019-140.pdf.
- Bannert, Jonas; Schütte, Carsten; von Düsterlho, Jens-Eric (2023): Increasing the Share of Renewable Energy in the Transport Sector – Effects of Modified Multiple Crediting Factors in the German Environmental Economic Instrument GHG Quota (“THG-Minderungsquote”). In: 2023 19th International Conference on the European Energy Market (EEM). S. 1–11. <https://doi.org/10.1109/EEM58374.2023.10161865>.
- BDI (2021): Klimapfade 2.0. Ein Wirtschaftsprogramm für Klima und Zukunft. Bundesverband der Deutschen Industrie (BDI). https://issuu.com/bdi-berlin/docs/211021_bdi_klimapfade_2.0_-_gesamtstudie_-_vorabve.
- Bechberger, Mischa; Vorholt, Frederik (2021): Nachhaltigkeit der Batteriezellfertigung in Europa Wie nachhaltig sind Batterien und Elektromobilität wirklich? Publikation der wissenschaftlichen Begleitung zur Fördermaßnahme Batteriezellfertigung im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie. https://vdiv.de/sites/default/files/document/Studie_Nachhaltigkeit-der-Batteriezellfertigung-in-Europa.pdf.
- BMU (2019): Klimaschutzprogramm 2030. Maßnahmen zur Erreichung der Klimaschutzziele 2030. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMU). S. 180. https://www.bmu.de/fileadmin/Daten_BMU/Pool/Broschueren/klimaschutzprogramm_2030_bf.pdf.
- BMU (2021): Wie umweltfreundlich sind Elektroautos? Eine ganzheitliche Bilanz. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMU). https://www.bmu.de/fileadmin/Daten_BMU/Pool/Broschueren/elektroautos_bf.pdf.
- BMUV (2021): Bekanntmachung des Schätzwertes der anrechenbaren energetischen Menge elektrischen Stroms für ein reines Batterieelektrofahrzeug gemäß § 7 Absatz 3 der Verordnung zur Festlegung weiterer Bestimmungen zur Treibhausgasminderung bei Kraftstoffen. Bekanntmachung. Veröffentlicht am Donnerstag, 16. Dezember 2021 BAnz AT 16.12.2021 B3. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMUV). https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/366/dokumente/banz_at_16.12.2021_b3.pdf.
- BMVI (2014): Berechnung des Energieverbrauchs und der Treibhausgasemissionen des ÖPNV.

- Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI). S. 60. https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Anlage/G/energieverbrauch-treibhausgasemission-oepnv.pdf?__blob=publicationFile.
- BMVI (2020): Gesamtkonzept klimafreundliche Nutzfahrzeuge. Mit alternativen Antrieben auf dem Weg zur Nullemissionslogistik auf der Straße. Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI). S. de. https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Publikationen/G/gesamtkonzept-klimafreundliche-nutzfahrzeuge.pdf?__blob=publicationFile.
- BMW (2020): Die Nationale Wasserstoffstrategie. Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMW). https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Publikationen/Energie/die-nationale-wasserstoffstrategie.pdf?__blob=publicationFile.
- BMWK; AGEE-Stat (2022): Zeitreihen zur Entwicklung der erneuerbaren Energien in Deutschland unter Verwendung von Daten der Arbeitsgruppe Erneuerbare Energien-Statistik (AGEE-Stat) (Stand: September 2022). Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK); Arbeitsgruppe Erneuerbare Energien-Statistik (AGEE-Stat). https://www.erneuerbare-energien.de/EE/Redaktion/DE/Downloads/zeitreihen-zur-entwicklung-der-erneuerbaren-energien-in-deutschland-1990-2021.pdf;jsessionid=DF6D88B521E969F43BA140B6F7F1F814?__blob=publicationFile&v=36.
- BMWK; AGEE-Stat (2023): Erneuerbare Energien in Deutschland Daten zur Entwicklung im Jahr 2022. Hintergrund Februar 2023. Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK); Arbeitsgruppe Erneuerbare Energien-Statistik (AGEE-Stat). <https://www.erneuerbare-energien.de/EE/Redaktion/DE/Downloads/entwicklung-der-erneuerbaren-energien-in-deutschland-2020.pdf>.
- BNetzA (2022): Monitoringbericht 2021. Bundesnetzagentur für Elektrizität, Gas, Telekommunikation, Post und Eisenbahnen (BNetzA). https://www.bundesnetzagentur.de/SharedDocs/Mediathek/Monitoringberichte/Monitoringbericht_Energie2021.pdf?__blob=publicationFile&v=2.
- BNetzA (2023): Ladeinfrastruktur (LIS) in Zahlen. Stand: 01. November 2022. Bundesnetzagentur für Elektrizität, Gas, Telekommunikation, Post und Eisenbahnen (BNetzA). <https://www.bundesnetzagentur.de/DE/Fachthemen/ElektrizitaetundGas/E-Mobilitaet/start.html>.
- BSR electric (2020): Use Case 3: E-Buses in Hamburg and Tartu. Baltic Sea Region electric (BSR electric). <https://bsr-electric.eu/content/5-use-cases/e-buses/final-report-use-case-3.pdf>.
- Bundesregierung (2022a): Masterplan Ladeinfrastruktur II der Bundesregierung. https://bmdv.bund.de/SharedDocs/DE/Anlage/G/masterplan-ladeinfrastruktur-2.pdf?__blob=publicationFile.
- Bundesregierung (2022b): CO₂-Preis für alle fossilen Brennstoffe. Änderungen im Emissionshandelsgesetz. Pressemitteilung 16. November 2022. <https://www.bundesregierung.de/breg-de/suche/co2-preis-kohle-abfallbrennstoffe-2061622>.
- Bundestag (2022): Bundeshaushaltsplan 2023. Einzelplan 60. Allgemeine Finanzverwaltung. <https://www.bundeshaushalt.de/static/daten/2023/soll/epl60.pdf>.
- Demir, Murat Emre; Dincer, Ibrahim (2018): Cost Assessment and Evaluation of Various

- Hydrogen Delivery Scenarios. In: International Journal of Hydrogen Energy 43(22), S. 10420–10430. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2017.08.002>.
- Dena (2021): Dena-Leitstudie: Aufbruch Klimaneutralität. Eine gesamtgesellschaftliche Aufgabe. Abschlussbericht. Deutsche Energie-Agentur GmbH (dena). https://www.dena.de/fileadmin/dena/Publikationen/PDFs/2021/Abschlussbericht_dena-Leitstudie_Aufbruch_Klimaneutralitaet.pdf.
- Dena; LBST (2017): The potential of electricity-based fuels for low-emission transport in the EU. An expertise by LBST and dena. «E-FUELS» STUDY. Deutsche Energie-Agentur (Dena); Ludwig-Bölkow-Systemtechnik GmbH (LBST). https://www.dena.de/fileadmin/dena/Dokumente/Pdf/9219_E-FUELS-STUDY_The_potential_of_electricity_based_fuels_for_low_emission_transport_in_the_EU.pdf.
- DERA (2021): Batterierohstoffe für die Elektromobilität. Deutsche Rohstoffagentur (DERA). https://www.bgr.bund.de/DERA/DE/Downloads/DERA%20Themenheft-01-21.pdf;jsessionid=3F8C4F26FF617FCBBD0E0757112C5EFA.2_cid331?_blob=publicationFile&v=6.
- Deutsche Umwelthilfe; foodwatch; Greenpeace; NABU; Robin Wood; Transport & Environment (2022): Mythen der Biosprit-Lobby. https://www.greenpeace.de/publikationen/Biosprit_Faktencheck.pdf.
- DIN EN 16258:2013-03 (o.J.): Methode zur Berechnung und Deklaration des Energieverbrauchs und der Treibhausgasemissionen bei Transportdienstleistungen (Güter- und Personenverkehr); Deutsche Fassung EN_16258:2012. <https://doi.org/10.31030/1894795>.
- DIW Econ (2021): Grenzen einer CO₂-Bepreisung Dekarbonisierungsmaßnahmen jenseits eines CO₂-Preises. Eine Studie für Greenpeace Deutschland. https://www.greenpeace.de/sites/default/files/publications/gp_die_grenzen_eines_co2-preises.pdf.
- DLR (2020): Wasserstoff als ein Fundament der Energiewende. Teil 2: Sektorenkopplung und Wasserstoff: Zwei Seiten der gleichen Medaille. Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V. (DLR). S. 52. https://www.dlr.de/content/de/downloads/publikationen/broschueren/2020/wasserstoffstudie-teil-2.pdf?_blob=publicationFile&v=4.
- Doppelbauer, Martin (2020): Grundlagen der Elektromobilität: Technik, Praxis, Energie und Umwelt. Wiesbaden (Heidelberg): Springer Vieweg.
- DWV (2023): Appell an die Bundesregierung zur Transformation der Mobilität in Deutschland. Brennstoffzellen-Lkw für eine gesicherte Versorgung der Märkte. Deutscher Wasserstoff- und Brennstoffzellen-Verband e.V. (DWV). <https://dwv-info.de/wp-content/uploads/2023/04/DWV-Appell-zur-Unterstuetzung-der-BZ-Mobilitaet.pdf>.
- E-Bridge (2022): H₂-BAROMETER. Unabhängige Bewertung der Wasserstoffwirtschaft in Deutschland. Ausgabe 2/2022. September 2022. https://e-bridge.de/wp-content/uploads/2023/02/2022_Ausgabe-2_H2-Barometer_E-Bridge.pdf.
- EEA (2022): Decarbonising Road Transport — the Role of Vehicles, Fuels and Transport Demand. Transport and Environment Report 2021. European Environment Agency (EEA). <https://www.eea.europa.eu/publications/t>

- transport-and-environment-report-2021/download.
- EEA; Ember (2023): Preisentwicklung von CO₂-Emissionsrechten im europäischen Emissionshandel (EU-ETS) von 2005 bis 2022 (in Euro pro Tonne CO₂-Äquivalent). European Environment Agency (EEA); Ember.
<https://de.statista.com/statistik/daten/studie/1304069/umfrage/preisentwicklung-von-co2-emissionsrechten-in-eu/>.
- en2x (2022): Wirtschaftsverband Fuels und Energie e.V. (en2x). Wirtschaftsverband Fuels und Energie e.V. (en2x).
<https://en2x.de/service/statistiken/verbraucherpreise/>.
- ENVI (2022): Klimaschutz: Einigung über ehrgeizigeren EU-Emissionshandel (ETS). Pressemitteilung. 19.12.2022. Ausschuss für Umweltfragen, öffentliche Gesundheit und Lebensmittelsicherheit des EU-Parlaments (ENVI).
<https://www.europarl.europa.eu/news/de/press-room/20221212IPR64527/klimaschutz-einigung-uber-ehrgeizigeren-eu-emissionshandel-ets>.
- EU-Richtlinie zur Förderung der Nutzung von Energie aus erneuerbaren Quellen (2018): Richtlinie (EU) 2018/2001 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 11. Dezember 2018 zur Förderung der Nutzung von Energie aus erneuerbaren Quellen. S. 82–209.
<http://data.europa.eu/eli/dir/2018/2001/oj/deu>.
- European Commission (2021): Proposal for a Directive of the European Parliament and of the Council amending Directive (EU) 2018/2001 of the European Parliament and of the Council, Regulation (EU) 2018/1999 of the European Parliament and of the Council and Directive 98/70/EC of the European Parliament and of the Council as regards the promotion of energy from renewable sources, and repealing Council Directive (EU) 2015/652 {SEC(2021) 657 final} - {SWD(2021) 620 final} - {SWD(2021) 621 final} - {SWD(2021) 622 final}. COM(2021) 557 final. 2021/0218 (COD).
<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:52021PC0557>.
- Felbermayr, Gabriel; Peterson, Sonja; Rickels, Wilfried (2019): Für ein duales System der CO₂-Bepreisung in Deutschland und Europa. Kiel Focus. <https://www.ifw-kiel.de/de/publikationen/kiel-focus/2019/fuer-ein-duales-system-der-co2-bepreisung-in-deutschland-und-europa-0/>.
- FNR (2023): Kraftstoffverbrauch in Deutschland 2022. Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. (FNR).
<https://mediathek.fnr.de/kraftstoffverbrauch-in-deutschland.html>.
- Fraunhofer ISI (2018): Alternative Antriebe und Kraftstoffe im Straßengüterverkehr – Handlungsempfehlungen für Deutschland. Fraunhofer Institute for Systems and Innovation Research (Fraunhofer ISI).
https://www.isi.fraunhofer.de/content/dam/isi/dokumente/cce/2018/Thesen_Zukunft_StrG%C3%BCterverkehr.pdf.
- Fraunhofer ISI (2020): Batterien für Elektroautos: Faktencheck und Handlungsbedarf. Fraunhofer Institute for Systems and Innovation Research (Fraunhofer ISI).
<https://www.isi.fraunhofer.de/content/dam/isi/dokumente/cct/2020/Faktencheck-Batterien-fuer-E-Autos.pdf>.
- Fraunhofer ISI (2021a): Stromgestehungskosten Erneuerbare Energien. Juni 2021. Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung (Fraunhofer ISI).
<https://www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/de/documents/publications/studies>

- /DE2021_ISE_Studie_Stromgestehungskosten_Erneuerbare_Energien.pdf.
- Fraunhofer ISI (2021b): Langfristszenarien für die Transformation des Energiesystems in Deutschland. Kurzbericht: 3 Hauptszenarien. Fraunhofer Institute for Systems and Innovation Research (Fraunhofer ISI). https://www.isi.fraunhofer.de/content/dam/isi/dokumente/cce/2021/LFS_Kurzbericht.pdf.
- Fraunhofer ISI (2021c): Langfristszenarien für die Transformation des Energiesystems in Deutschland. Treibhausgasneutrale Hauptszenarien. Modul Verkehr. Fraunhofer Institute for Systems and Innovation Research (Fraunhofer ISI). https://www.langfristszenarien.de/en/ertile-explorer-wAssets/docs/LFS3_Langbericht_Verkehr_final.pdf.
- Fredebeul-Krein, Markus; Koch, Walter A. S.; Kulesa, Margareta E.; Sputek, Agnes (2014): Grundlagen der Wirtschaftspolitik. 4., vollständig überarbeitete Auflage. UTB Wirtschaftswissenschaften 8265. München: UVK/Lucius.
- Füssel, Andreas (2017): Technische Potenzialanalyse der Elektromobilität: Stand der Technik, Forschungsausblick und Projektion auf das Jahr 2025. Wiesbaden: Springer Vieweg.
- GreenTax (2021a): Strom als Erfüllungsoption für die THG-Quote. Verfasst von David Pflegler. <https://www.greentrax.de/wissen/strom-als-erfuellungsoption-fuer-die-thg-quote>.
- GreenTax (2021b): Wasserstoff als Erfüllungsoption für die THG-Quote. Verfasst von David Pflegler. <https://www.greentrax.de/wissen/wasserstoff-als-erfuellungsoption-fuer-die-thg-quote>.
- H2 Mobility (2021): Hydrogen Refuelling For Heavy Duty Vehicles. Overview. https://h2-mobility.de/wp-content/uploads/sites/2/2021/08/H2-MOBILITY_Overview-Hydrogen-Refuelling-For-Heavy-Duty-Vehicles_2021-08-10.pdf.
- H2 Mobility (2022): E-Mail vom 19.04.2022. H2 MOBILITY Deutschland GmbH & Co. KG.
- H2 Mobility (2023): H2 Tankstellen. Stand 01.01.2023. <https://h2.live/>.
- de Haas, Samuel; Herold, Daniel; Schäfer, Jan T. (2019): Pegel runter, Preise hoch — Wie der Rheinpegel die Tankstellenpreise in Hamburg beeinflusst. In: Wirtschaftsdienst 99(4), S. 296–298. <https://doi.org/10.1007/s10273-019-2447-3>.
- Hacker, Florian; Jöhrens, Julius; Plötz, Patrick (2020): Wirtschaftlichkeit, Umweltwirkung und Ausbauszenarien von Oberleitungs-Lkw in Deutschland: Eine Synthese. Berlin, Heidelberg, Karlsruhe: Öko-Institut, ifeu, Fraunhofer ISI. <https://www.oeko.de/fileadmin/oekodoc/Stand-des-Wissens-OH-Lkw-Zusammenfassung.pdf>.
- Hansestadt Hamburg (2019): Erste Fortschreibung des Hamburger Klimaplan. <https://www.hamburg.de/contentblob/13287332/bc25a62e559c42bfaae795775ef1ab4e/data/d-erste-fortschreibung-hamburger-klimaplan.pdf>.
- HBEFA (2022): Handbuch für Emissionsfaktoren des Straßenverkehrs. Handbook emission factors for road transport (HBEFA). <https://www.hbefa.net/d/>.
- Heinzmann, Paul; Glöser-Chahoud, Simon; Dahmen, Nicolaus; Langenmayr, Uwe; Schultmann, Frank (2021): Techno-ökonomische Bewertung der Produktion regenerativer synthetischer Kraftstoffe. Working Paper No 63.

- <https://publikationen.bibliothek.kit.edu/1000140638/134680650>.
- Heybrock, Britta (2022): Vergleich alternativer Antriebstechnologien eines Abfallsammelfahrzeugs - Eine empirische Nutzwertanalyse verschiedener Entsorgungsfachbetriebe in Norddeutschland. Masterarbeit. HWI Hamburg.
- Hoekstra, Auke (2019): The Underestimated Potential of Battery Electric Vehicles to Reduce Emissions. In: Joule 3(6), S. 1412–1414.
<https://doi.org/10.1016/j.joule.2019.06.002>.
- Hoekstra, Auke; Steinbuch, Maarten (2020): Vergleich der lebenslangen Treibhausgasemissionen von Elektroautos mit den Emissionen von Fahrzeugen mit Benzin- oder Dieselmotoren. Technische Universiteit Eindhoven.
https://www.oliver-krischer.eu/wp-content/uploads/2020/08/deutsch_Studie-EAuto-versus-Verbrenner_CO2.pdf.
- Hoffmann, Burkhard (2022): Grüner Wasserstoff im Verkehrssektor: Ein Rundflug über aktuelle europarechtliche Entwicklungen. In: Zeitschrift für das gesamte Recht der Energiewirtschaft (EnWZ) (7/2022), S. 255–261.
- HSS (2019): Versorgungssicherheit bei Kritischen Rohstoffen. Neue Herausforderungen durch Digitalisierung und Erneuerbare Energien. aktuelle analysen. 73. Hanns-Seidel-Stiftung e.V. (HSS).
https://www.hss.de/download/publications/AA_73_Versorgungssicherheit.pdf.
- Hydrogen Council (2020): Path to Hydrogen Competitiveness. A Cost Perspective.
https://hydrogencouncil.com/wp-content/uploads/2020/01/Path-to-Hydrogen-Competitiveness_Full-Study-1.pdf.
- Hydrogen Council; McKinsey & Company (2021): Hydrogen Insights. A Perspective on Hydrogen Investment, Market Development and Cost Competitiveness.
<https://hydrogencouncil.com/wp-content/uploads/2021/02/Hydrogen-Insights-2021.pdf>.
- ICCT (2021): A Global Comparison of the Life-Cycle Greenhouse Gas Emissions of Combustion Engine and Electric Passenger Cars. International Council on Clean Transportation Europe (ICCT). S. 86.
https://theicct.org/sites/default/files/publications/Global-LCA-passenger-cars-jul2021_0.pdf.
- IEA (2022a): Global EV Outlook 2022. Securing supplies for an electric future. International Energy Agency (IEA).
<https://iea.blob.core.windows.net/assets/a8fb04c-4f75-42fc-973a-6e54c8a4449a/GlobalElectricVehicleOutlook2022.pdf>.
- IEA (2022b): Global Hydrogen Review 2022. International Energy Agency (IEA).
<https://iea.blob.core.windows.net/assets/a8fb04c-4f75-42fc-973a-6e54c8a4449a/GlobalElectricVehicleOutlook2022.pdf>.
- IEA (2022c): The Role of Critical Minerals in Clean Energy Transitions. World Energy Outlook Special Report. International Energy Agency (IEA).
<https://iea.blob.core.windows.net/assets/fd2a83b-8c30-4e9d-980a-52b6d9a86fdc/TheRoleofCriticalMineralsinCleanEnergyTransitions.pdf>.
- IFEU (2020): Roadmap für die Einführung eines Oberleitungs-Lkw-Systems in Deutschland. Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg (ifeu). S. 48.
<https://www.ifeu.de/fileadmin/uploads/2020-08-05-Roadmap-OH-Lkw-web.pdf>.
- ifeu (2021): Potentialanalyse für Batterie-Lkw. Teilbericht im Rahmen des Vorhabens „Elektrifizierungspotenzial des Güter- und

- Busverkehrs - My eRoads“. Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg (ifeu).
https://www.ifeu.de/fileadmin/uploads/2021-07-29_-_My_eRoads_-_Potentialanalyse_Batterie-Nfz_-_final.pdf.
- IKEM (2021): Studie „Richtlinien zur öffentlichen Beschaffung von Wasserstofffahrzeugen“. Im Rahmen der Norddeutschen Wasserstoffstrategie. Institut für Klimaschutz, Energie und Mobilität e.V. (IKEM).
https://norddeutschewasserstoffstrategie.de/wp-content/uploads/2022/03/2022-03-23_Studie-Richtlinien_HF-3_Stand-September-2021.pdf.
- IWES (2017): Mittel- und Langfristige Potenziale von PtL und H2-Importen aus internationalen EE-Vorzugsregionen. Teilbericht im Rahmen des Projektes: KLIMWIRKSAMKEIT ELEKTROMOBILITÄT. Fraunhofer Institute for Wind Energy and Energy System Technology (Fraunhofer IWES).
https://www.erneuerbar-mobil.de/sites/default/files/2019-10/Teilbericht_Potenziale_PtL_H2_Importe_FraunhoferIWES.pdf.
- Jacob, Eberhard (2019): C-1 Oxygenate als nachhaltige Kraftstoffe und deren günstige Eigenschaften. In: Maus, Wolfgang (Hrg.): Zukünftige Kraftstoffe. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. S. 155–180.
https://doi.org/10.1007/978-3-662-58006-6_9.
- KBA (2022a): Bestand an Kraftfahrzeugen und Kraftfahrzeuganhängern nach Zulassungsbezirken (FZ1). Kraftfahrtsbundesamt (KBA).
https://www.kba.de/DE/Statistik/Fahrzeuge/Bestand/FahrzeugklassenAufbauarten/fahrzeugklassen_node.html.
- KBA (2022b): Fahrleistungsstatistik (Inländerfahrleistung) Verkehr in Kilometern. Zeitreihe 2014-2021 (VK). Kraftfahrtsbundesamt (KBA).
https://www.kba.de/DE/Statistik/Kraftverkehr/Verkehr_in_Kilometern/Zeitreihe_2014-2021/VK/VK_node.html.
- KBA (2023): Bestand an Kraftfahrzeugen und Kraftfahrzeuganhängern nach Bundesländern, Fahrzeugklassen und ausgewählten Merkmalen (FZ 27). 1. Januar 2023. Kraftfahrtsbundesamt (KBA).
https://www.kba.de/DE/Statistik/Produktkatalog/produkte/Fahrzeuge/fz27_b_uebersicht.html?nn=1146130.
- Kluschke, Philipp; Gnann, Till; Plötz, Patrick; Wietschel, Martin (2019): Market Diffusion of Alternative Fuels and Powertrains in Heavy-Duty Vehicles: A Literature Review. In: Energy Reports 5, S. 1010–1024.
<https://doi.org/10.1016/j.egy.2019.07.017>.
- Kopernikus-Projekt Ariadne (2021): Ariadne-Report: Deutschland auf dem Weg zur Klimaneutralität 2045 - Szenarien und Pfade im Modellvergleich.
https://ariadneprojekt.de/media/2022/02/Ariadne_Szenarienreport_Oktober2021_corr0222.pdf.
- Kurzweil, Peter; Dietlmeier, Otto (2018): Elektrochemische Speicher: Superkondensatoren, Batterien, Elektrolyse-Wasserstoff, rechtliche Rahmenbedingungen. 2., aktualisierte und erweiterte Auflage. Wiesbaden [Heidelberg]: Springer Vieweg.
<https://doi.org/10.1007/978-3-658-21829-4>.
- 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, S. 117834.
<https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2020.117834>.
- Liebreich, Michael (2021): The Clean Hydrogen Ladder. V4.1.

- <https://www.linkedin.com/pulse/clean-hydrogen-ladder-v40-michael-liebreich/>.
- Liu, Lan (2018): Einfluss der privaten Elektrofahrzeuge auf Mittel- und Niederspannungsnetze. Vom Fachbereich Elektrotechnik und Informationstechnik der Technischen Universität Darmstadt zur Erlangung des akademischen Grades eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.) genehmigte Dissertation. <https://d-nb.info/1150400129/34>.
- McKinsey & Company (2020): Hydrogen-Powered Aviation: A Fact Based Study of Hydrogen Technology, Economics, and Climate Impact by 2050. Publications Office of the European Union. Luxemburg. <https://data.europa.eu/doi/10.2843/471510>.
- MELUND SH (2020): Wasserstoffstrategie.SH. Wasserstoffstrategie des Landes Schleswig-Holstein. Ministerium für Energiewende, Landwirtschaft, Umwelt, Natur und Digitalisierung des Landes Schleswig-Holstein (MELUND SH). https://wasserstoffwirtschaft.sh/file/h2-strategie_broschuere.pdf.
- MWVATT SH (2020): H2 - Mobilität und Förderrichtlinien Schleswig-Holstein. Gutachten. Ministerium für Wirtschaft, Verkehr, Arbeit, Technologie und Tourismus des Landes Schleswig-Holstein (MWVATT SH). https://www.schleswig-holstein.de/DE/fachinhalte/E/erneuerbare_energien/Downloads/gutachten_H2_Mobilitaet_Foerderrichtlinien_Dez2020.pdf?__blob=publicationFile&v=1.
- Nationaler Wasserstoffrat (2023): Versorgung des Verkehrssektors mit grünem Wasserstoff und seinen Derivaten. Stellungnahme 1. Februar 2023. https://www.wasserstoffrat.de/fileadmin/wasserstoffrat/media/Dokumente/2023/2023-02-01-NWR_Stellungnahme_Wasserstoff-im-Verkehr.pdf.
- NIO (2022): Erste Power-Swap-Station (PSS) von NIO in Deutschland geht ans Netz. Pressemitteilung. 0. https://www.nio.com/de_DE/news/202209280001.
- Nobis, Philipp Richard Rainer (2016): Entwicklung und Anwendung eines Modells zur Analyse der Netzstabilität in Wohngebieten mit Elektrofahrzeugen, Hausspeichersystemen und PV-Anlagen. Von der Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik der Technischen Universität München zur Erlangung des akademischen Grades eines Doktor-Ingenieurs genehmigte Dissertation. <https://www.ffe.de/wp-content/uploads/2021/10/Dissertation-Philipp-Nobis.pdf>.
- NOW GmbH (2021a): Klimafreundliche Nutzfahrzeuge: rund 2000 LKW beantragt. Pressemitteilung 01.12.2021. <https://www.now-gmbh.de/aktuelles/pressemitteilungen/bm-dv-startet-2-foerderrunde-fuer-saubere-busse/>.
- NOW GmbH (2021b): Programmbegleitforschung Innovative Antriebe und Fahrzeuge Innovative Antriebe im straßengebundenen ÖPNV. Abschlussbericht. NOW. https://www.now-gmbh.de/wp-content/uploads/2022/04/NOW_Abschlussbericht_Begleitforschung-Bus.pdf.
- NOW GmbH (2021c): Wasserstoff-Verbrennungsmotor als alternativer Antrieb. Metastudie. https://www.now-gmbh.de/wp-content/uploads/2021/10/NOW_Metastudie_Wasserstoff-Verbrennungsmotor.pdf.
- NOW GmbH (2022a): BMDV startet 2. Förderrunde für saubere Busse. Pressemitteilung 23.05.2022. <https://www.now-gmbh.de/aktuelles/pressemitteilungen/bm>

- dv-startet-2-foerderrunde-fuer-saubere-busse/.
- NOW GmbH (2022b): BMDV unterstützt den Hochlauf des klimafreundlichen Straßengüterverkehrs. Pressemitteilung 22.09.2022. <https://www.now-gmbh.de/aktuelles/pressemitteilungen/bmdv-unterstuetzt-den-hochlauf-des-klimafreundlichen-strassengueterverkehrs/>.
- NOW GmbH (2023): Factsheet: Elektromobilität und Rohstoffe Stand: März 2023. https://www.now-gmbh.de/wp-content/uploads/2023/03/NOW_Factsheet-Elektromobilitaet-und-Rohstoffe.pdf.
- NPM - AG 1 (2020): Antriebswechsel Nutzfahrzeuge - Wege zur Dekarbonisierung schwerer Lkw mit Fokus der Elektrifizierung. Werkstattbericht. Nationale Plattform Zukunft der Mobilität - Arbeitsgruppe 1: Klimaschutz im Verkehr (NPM AG 1). https://www.plattform-zukunft-mobilitaet.de/wp-content/uploads/2020/12/NPM_AG1_Werkstattbericht_Nutzfahrzeuge.pdf.
- NPM - AG 1 (2021): Wege für mehr Klimaschutz im Verkehr. Nationale Plattform Zukunft der Mobilität - Arbeitsgruppe 1: Klimaschutz im Verkehr (NPM AG 1). https://www.plattform-zukunft-mobilitaet.de/wp-content/uploads/2021/07/NPM_AG1_Weg-e-fuer-mehr-Klimaschutz.pdf.
- NPM - AG 2 (2020): Einsatzmöglichkeiten unter realen Rahmenbedingungen. Berlin: Nationale Plattform Zukunft der Mobilität - Arbeitsgruppe 2: Alternative Antriebe und Kraftstoffe für nachhaltige Mobilität (NPM AG 2). S. 72. https://www.plattform-zukunft-mobilitaet.de/wp-content/uploads/2020/06/NPM-AG-2_Einsatzmoeglichkeiten-unter-realen-Rahmenbedingungen.pdf.
- NRL-Experteninterview (2022): Experten-Interviews mit Praxispartnern aus der AG 7 des Norddeutschen Reallabors.
- Öko-Institut (2017): Strategien für die nachhaltige Rohstoffversorgung der Elektromobilität. Synthesepapier zum Rohstoffbedarf für Batterien und Brennstoffzellen. Studie im Auftrag von Agora Verkehrswende. Institut für angewandte Ökologie (Öko-Institut). https://www.agora-verkehrswende.de/fileadmin/Projekte/2017/Nachhaltige_Rohstoffversorgung_Elektromobilitaet/Agora_Verkehrswende_Synthesepapier_WEB.pdf.
- Öko-Institut (2021): Die Wasserstoffstrategie 2.0 für Deutschland. Institut für angewandte Ökologie (Öko-Institut). S. 235. <https://www.stiftung-klima.de/app/uploads/2021/06/Oeko-Institut-2021-Die-Wasserstoffstrategie-2.0-fuer-Deutschland-1.1.pdf>.
- Öko-Institut; HHN (2020): Status quo und Perspektiven alternativer Antriebstechnologien für den schweren Straßengüterverkehr. Erster Teilbericht des Forschungs- und Dialogvorhabens „StratES: Strategie für die Elektrifizierung des Straßengüterverkehr“. Institut für angewandte Ökologie (Öko-Institut); Hochschule Heilbronn (HHN).
- Olyx (2023): E-Mail und Telefonkontakt am 08.03.2023.
- Pietzcker, Robert; Feuerhahn, Janik; Haywood, Luke; Knopf, Brigitte; Leukhardt, Falko; Luderer, Gunnar et al. (2021): Notwendige CO₂-Preise zum Erreichen des europäischen Klimaziels 2030. Ariadne-Hintergrund. Potsdam Institute for Climate Impact Research. S. 20 pages. <https://doi.org/10.48485/PIK.2021.007>.
- Plötz, Patrick (2022): Hydrogen Technology Is Unlikely to Play a Major Role in Sustainable Road Transport. In: Nature Electronics 5(1), S. 8–10.

- <https://doi.org/10.1038/s41928-021-00706-6>.
- Prognos; Öko-Institut; Wuppertal-Institut (2021a): Klimaneutrales Deutschland 2045. Wie Deutschland seine Klimaziele schon vor 2050 erreichen kann. Datenanhang, Version 1.0. Studie im Auftrag von Stiftung Klimaneutralität, Agora Energiewende und Agora Verkehrswende. Prognos; Institut für angewandte Ökologie (Öko-Institut); Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie (Wuppertal-Institut). <https://www.agora-energiewende.de/veroeffentlichungen/klimaneutrales-deutschland-2045-datenanhang/>.
- Prognos; Öko-Institut; Wuppertal-Institut (2021b): Klimaneutrales Deutschland 2045. Wie Deutschland seine Klimaziele schon vor 2050 erreichen kann. Langfassung im Auftrag von Stiftung Klimaneutralität, Agora Energiewende und Agora Verkehrswende. Prognos; Institut für angewandte Ökologie (Öko-Institut); Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie (Wuppertal-Institut). https://static.agora-energiewende.de/fileadmin/Projekte/2021/2021_04_KNDE45/A-EW_231_KNDE2045_Langfassung_DE_WEB.pdf.
- Quaschnig, Volker (2018): Erneuerbare Energien und Klimaschutz: Hintergründe, Techniken und Planung, Ökonomie und Ökologie, Energiewende. 4., überarbeitete und erweiterte Auflage. München: Hanser.
- Reuß, Markus; Grube, Thomas; Robinius, Martin; Stolten, Detlef (2019): A Hydrogen Supply Chain with Spatial Resolution: Comparative Analysis of Infrastructure Technologies in Germany. In: Applied Energy 247, S. 438–453. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.04.064>.
- Santarius, Tilman (2012): Der Rebound-Effekt Über die unerwünschten Folgen der erwünschten Energieeffizienz. <https://epub.wupperinst.org/frontdoor/de/liver/index/docId/4219/file/ImpW5.pdf>.
- Schneidewind, Uwe (2019): Die große Transformation: eine Einführung in die Kunst gesellschaftlichen Wandels. 4. Auflage. Fischer 70259. Frankfurt am Main: Fischer Taschenbuch.
- Schürmann, Mattis (2022a): THG Quote Elektro LKW. Blogartikel auf wirkaufendeinethg.de vom 22.11.2022. <https://www.wirkaufendeinethg.de/blog/2022/11/22/thg-quote-elektro-lkw/>.
- Schürmann, Mattis (2022b): THG Quote für Wasserstoff-LKW - Möglich oder nicht? Blogartikel auf wirkaufendeinethg.de vom 29.11.2022. <https://www.wirkaufendeinethg.de/blog/2022/11/29/thg-quote-fuer-wasserstoff-lkw/>.
- Scientist for Future (2022): Wasserstoff in der Energiewende unverzichtbar, aber keine Universallösung. Policy-Paper Wärmewende 03-2022. https://info-de.scientists4future.org/wp-content/uploads/sites/36/2022/10/Policy_Paper_Wasserstoff.pdf.
- SPD; BÜNDNIS 90 / DIE GRÜNEN; FDP (2021): Mehr Fortschritt wagen Bündnis für Freiheit, Gerechtigkeit und Nachhaltigkeit. Koalitionsvertrag 2021 – 2025 zwischen der Sozialdemokratischen Partei Deutschlands (SPD), BÜNDNIS 90 / DIE GRÜNEN und den Freien Demokraten (FDP). Sozialdemokratischen Partei Deutschlands (SPD); BÜNDNIS 90 / DIE GRÜNEN; Freien Demokraten (FDP). <https://www.bundesregierung.de/resource/blob/974430/1990812/04221173eef9a6720059cc353d759a2b/2021-12-10-koav2021-data.pdf?download=1>.
- Specht, Jan Martin; Fabianek, Paul (2022): Vergleich von Wasserstoff- und Elektromobilität: Technische, ökonomische, soziale und ökologische Aspekte. Institute

- for Future Energy Consumer Needs and Behavior (FCN).
- SRU (2017): Umsteuern erforderlich: Klimaschutz im Verkehrssektor. Sondergutachten. Berlin: Sachverständigenrat für Umweltfragen (SRU). S. 218. https://umweltrat.de/SharedDocs/Downloads/DE/02_Sondergutachten/2016_2020/2017_11_SG_Klimaschutz_im_Verkehrssektor.pdf?__blob=publicationFile&v=13.
- SRU (2021): Wasserstoff im Klimaschutz: Klasse statt Masse. Berlin: Sachverständigenrat für Umweltfragen (SRU). S. 101. https://www.umweltrat.de/SharedDocs/Downloads/DE/04_Stellungnahmen/2020_2024/2021_06_stellungnahme_wasserstoff_im_klimaschutz.pdf?__blob=publicationFile&v=4.
- Staiß, Frithjof; Adolf, Jörg; Ausfelder, Florian; Erdmann, Christoph; Hebling, Christopher; Jordan, Thomas et al. (2022): Optionen für den Import grünen Wasserstoffs nach Deutschland bis zum Jahr 2030: Transportwege – Länderbewertungen – Realisierungserfordernisse. acatech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften. S. 128. https://doi.org/10.48669/ESYS_2022-6.
- T&E (2020): How clean are electric cars? T&E's analysis of electric car lifecycle CO₂ emissions. Transport & Environment's (T&E). <https://www.transportenvironment.org/sites/te/files/downloads/T%26E%E2%80%99s%20EV%20life%20cycle%20analysis%20LCA.pdf>.
- T&E (2021a): E-fuels testing: criticisms debunked. Transport & Environment's (T&E). https://www.transportenvironment.org/wp-content/uploads/2021/12/2021_12_response_misleading_criticism_e-fuels.pdf.
- T&E (2021b): Magic green fuels: Why synthetic fuels in cars will not solve Europe's pollution problems. Transport & Environment's (T&E). https://www.transportenvironment.org/wp-content/uploads/2021/11/2021_12_TE_e-fuels_cars_pollution.pdf.
- T&E (2022): UPDATE - T&E's analysis of electric car lifecycle CO₂ emissions. Transport & Environment's (T&E). https://www.transportenvironment.org/wp-content/uploads/2022/05/TE_LCA_Update-June.pdf.
- Töpler, Johannes; Lehmann, Jochen; Weizsäcker, Ernst Ulrich von (Hrg.) (2017): Wasserstoff und Brennstoffzelle: Technologien und Marktperspektiven. 2., aktualisierte und erweiterte Auflage. Berlin [Heidelberg]: Springer Vieweg. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-53360-4>.
- UBA (2019): Wege in eine ressourcenschonende Treibhausgasneutralität. RESCUE - Studie. Dessau-Roßlau: Umweltbundesamt (UBA). S. 443. https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/rescue_studie_cc_36-2019_wege_in_eine_ressourcenschonende_treibhausgasneutralitaet_auflage2_juni-2021.pdf.
- UBA (2020a): Aktualisierung der Modelle TREMOD/TREMOD-MM für die Emissionsberichterstattung 2020 (Berichtsperiode 1990-2018) Berichtsteil „TREMOD“. Umweltbundesamt (UBA). https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2020-06-29_texte_116-2020_tremod_2019_0.pdf.
- UBA (2020b): Environmental Criticality of Raw Materials. An assessment of

- environmental hazard potentials of raw materials from mining and recommendations for an ecological raw materials policy. 80/2020. Umweltbundesamt (UBA). https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2020-06-17_texte_80-2020_oekoressii_environmentalcriticality-report.pdf.
- UBA (2021): Erneuerbare Energie im Verkehr. In: Umweltbundesamt (UBA) <https://www.umweltbundesamt.de/daten/energie/erneuerbare-energie-im-verkehr>.
- UBA (2022a): Bekanntmachung gemäß § 5 Absatz 3 und Absatz 4 Satz 2 der Verordnung zur Festlegung weiterer Bestimmungen zur Treibhausgasminderung bei Kraftstoffen. Vom 4. Oktober 2022. Bekanntmachung. Veröffentlicht am Freitag, 14. Oktober 2022. BAnz AT 14.10.2022 B11. Umweltbundesamt (UBA). https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/366/dokumente/banz_at_14.10.2022_b11.pdf.
- UBA (2022b): Daten der Treibhausgasemissionen des Jahres 2021 nach KSG. Emissionsübersichten in Sektoren. Umweltbundesamt (UBA). https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/361/dokumente/2022_03_15_trendtabellen_thg_nach_sektoren_v1.0.xlsx.
- UBA (2022c): Der Europäische Emissionshandel. Umweltbundesamt (UBA). <https://www.umweltbundesamt.de/daten/klima/der-europaeische-emissionshandel#teilnehmer-prinzip-und-umsetzung-des-europaischen-emissionshandels>.
- UBA (2023a): Rekordeinnahmen im Emissionshandel: Über 13 Milliarden Euro für den Klimaschutz. Pressemitteilung Nr. 01/2023. 03.01.2023. Umweltbundesamt (UBA). <https://www.umweltbundesamt.de/presse/pressemitteilungen/rekordeinnahmen-im-emissionshandel-ueber-13>.
- UBA (2023b): UBA-Prognose: Treibhausgasemissionen sanken 2022 um 1,9 Prozent. Pressemitteilung Nr. 11/2023. 15.03.2023. Umweltbundesamt (UBA). <https://www.umweltbundesamt.de/presse/pressemitteilungen/uba-prognose-treibhausgasemissionen-sanken-2022-um>.
- Ueckerdt, Falko; Bauer, Christian; Dirnaichner, Alois; Everall, Jordan; Sacchi, Romain; Luderer, Gunnar (2021): Potential and Risks of Hydrogen-Based e-Fuels in Climate Change Mitigation. In: Nature Climate Change 11(5), S. 384–393. <https://doi.org/10.1038/s41558-021-01032-7>.
- VDE (2019): Alternativen zu Dieseltriebzügen im SPNV. Einschätzung der systemischen Potenziale. Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik e.V. (VDE). <https://www.vde.com/resource/blob/1885872/9b3e9ade292c3cc410860532c53ab88c/studie-alternativen-zu-dieseltriebzuegen-im-schienenpersonennahverkehr-data.pdf>.
- VDI; VDE (2019): Brennstoffzellen- und Batteriefahrzeuge - Bedeutung für die Elektromobilität. VDI/VDE-Studie. Verein Deutscher Ingenieure (VDI) & Verband der Elektrotechnik, Elektronik und Informationstechnik (VDE). https://www.vdi.de/fileadmin/pages/vdi_de/redakteure/ueber_uns/dateien/Studie_Brennstoffzellen_und_Batteriefahrzeuge.pdf.
- VDI; VDE (2022): Klimafreundliche Nutzfahrzeuge. Vergleich unterschiedlicher Technologie- pfade für CO2-neutrale und -freie Antriebe. VDI/VDE-Studie. Verein Deutscher Ingenieure (VDI) & Verband der Elektrotechnik, Elektronik und Informationstechnik (VDE).

- <https://www.vde.com/resource/blob/2104630/a53ea8b32612ce3f303406b795395d5a/klimafreundliche-nutzfahrzeuge-download-data.pdf>.
- Wambach, Achim (2022): Klima muss sich lohnen: ökonomische Vernunft für ein gutes Gewissen. Freiburg Basel Wien: Herder.
- Wiehl, Gunter (2023): Übersicht aktuell verfügbare Elektroautos. Stand 11.02.2023. Energie Stammtisch Freigericht. https://docs.google.com/spreadsheets/d/1m3QqVURB3-GGnMnqkdGvrA-n6IDpCkSf-hOtRzhLy_k/edit#gid=0.
- Wietschel, Martin; Kühnbach, Matthias; Rüdiger, David (2019): Die aktuelle Treibhausgasemissionsbilanz von Elektrofahrzeugen in Deutschland. Working Paper Sustainability and Innovation No. S 02/2019. Fraunhofer ISI. S. 49. https://www.isi.fraunhofer.de/content/dam/isi/dokumente/sustainability-innovation/2019/WP02-2019_Treibhausgasemissionsbilanz_von_Fahrzeugen.pdf.
- Wirtschafts- und Verkehrsministerien; der norddeutschen Küstenländer (2019): Norddeutsche Wasserstoffstrategie. Bremen, Hamburg, Mecklenburg-Vorpommern, Niedersachsen und Schleswig-Holstein. <https://norddeutschewasserstoffstrategie.de/wp-content/uploads/2020/11/norddt-H2-Strategie-final.pdf>.
- Wissenschaftlichen Dienste des Deutschen Bundestages (2022): Entkopplung des Benzinpreises vom Rohölpreis. WD 4-3000-035/22. <https://www.bundestag.de/resource/blob/892652/d7e6a2f28275857eafca7eb5e349a538/WD-4-035-22-pdf-data.pdf>.
- Wuppertal Institut (2019): Der Beitrag von synthetischen Kraftstoffen zur Verkehrswende: Optionen und Prioritäten. Kurzstudie im Auftrag von Greenpeace Deutschland. https://www.greenpeace.de/sites/www.greenpeace.de/files/publications/kurzstudie_kraftstoffe_verkehrswende.pdf.
- Wuppertal Institut (2020): CO2-neutral bis 2035: Eckpunkte eines deutschen Beitrags zur Einhaltung der 1,5-C-Grenze. Wuppertal. S. 113. https://fridaysforfuture.de/wp-content/uploads/2020/10/FFF-Bericht_Ambition2035_Endbericht_final_20201011-v.3.pdf.
- Zhou, Yuanrong; Searle, Stephanie (2022): Cost Of Renewable Hydrogen Produced Onsite At Hydrogen Refueling Stations In Europe. White paper. International Council on Clean Transportation Europe (ICCT). <https://theicct.org/wp-content/uploads/2022/02/fuels-eu-cost-renew-H-produced-onsite-H-refueling-stations-europe-feb22.pdf>.

V. Anhang

A.	TABELLE VERGLEICH DER ANTRIEBS-EFFIZIENZ-KOSTEN.....	XIX
B.	TABELLE ERLÖS THG-MINDERUNGSQUOTE.....	XXIV
A.	ANTRIEBSWENDE IN DEN VERSCHIEDENEN FAHRZEUGKLASSEN	XXVI
D.	TABELLE ANGENOMMENE ENERGIE-VERBRÄUCHE FÜR VERSCHIEDENE FAHRZEUGKLASSEN ...	XXX
E.	TABELLE GESAMTSYSTEMISCHE STUDIEN: BEDARF AN STROM, H2 UND PTL IM VERKEHRSSSEKTOR 2030, 2035 & 2045	XXXII

A. Tabelle Vergleich der Antriebs-Effizienz-Kosten

	Preis €/kWh	Antriebseffizienz	Tatsächliche Antriebskosten €/kWh
Strom ₂₀₂₁ – Haushaltskunde inklusive Netzentgelten, Steuern, Abgaben und Umlagen	0,3380 €/kWh (BNetzA 2022: 293)	77 %	0,424 €/Antriebs- kWh (ohne USt. 0,356 €/Antriebs-kWh)
Strom ₂₀₂₁ – Gewerbekunde (50 MWh/Jahr) inklusive Netzentgelten, Abgaben und Umlagen	0,2323 €/kWh (BNetzA 2022: 284)		0,302 €/Antriebs- kWh
Strom ₂₀₂₁ – Industriekunde (24 GWh/Jahr) inklusive Netzentgelten, Abgaben und Umlagen ohne Vergünstigungen	0,1694 €/kWh (BNetzA 2022: 281)		0,220 €/Antriebs- kWh
Strom ₂₀₂₃ – Haushaltskunde inklusive Netzentgelten, Steuern, Abgaben und Umlagen	0,4 €/kWh (aus Strompreisbremsegesetz)		0,520 €/Antriebs- kWh
Strom ₂₀₂₃ – Kleinunternehmen (weniger als 30.000 kWh/Vorjahr) - inklusive Netzentgelten, Steuern, Abgaben und Umlagen - ohne USt.	0,4 €/kWh (aus Strompreisbremsegesetz) – 19 % USt. = 0,336 €/kWh		0,447 €/Antriebs- kWh
Strom ₂₀₂₃ – Gewerbekunde (50 MWh/Jahr) – ohne USt.	0,13 €/kWh Strompreisbremse (aus Strompreisbremsegesetz) + 0,105 €/kWh für €/kWh für Netzentgelten, Steuern, Abgaben und Umlagen (orientiert an Strom ₂₀₂₁ (BNetzA 2022: 284)) → 0,235 €/kWh		0,240 €/Antriebs- kWh
Strom ₂₀₂₃ – Industriekunde (50 MWh/Jahr) – ohne USt.	0,13 €/kWh Strompreisbremse (aus Strompreisbremsegesetz) + 0,055 €/kWh für €/kWh für		0,169 €/Antriebs- kWh

	Netzentgelten, Steuern, Abgaben und Umlagen (orientiert an Strom ₂₀₂₁ (BNetzA 2022: 281)) → 0,185 €/kWh		
AC-Ladesäule ₂₀₂₂ Minimum	0,36 €/kWh (ADAC 2022)		0,468 €/Antriebs-kWh
AC-Ladesäule ₂₀₂₂ Maximum	0,49 €/kWh (ADAC 2022)		0,636 €/Antriebs-kWh
DC-Ladesäule ₂₀₂₂ Minimum	0,39 €/kWh (ADAC 2022)		0,506 €/Antriebs-kWh
DC-Ladesäule ₂₀₂₂ Maximum	0,74 €/kWh (ADAC 2022)		0,961 €/Antriebs-kWh
Wasserstoff ₂₀₂₁	9,5 €/kg --> 0,285 €/kWh		0,5588 €/Antriebs-kWh (ohne USt. 0,470 €/Antriebs-kWh)
Wasserstoff ₂₀₂₂ 350 bar	12,85 €/kg --> 0,386 €/kWh (ohne USt. 10,80 €/kg → 0,324 €/kWh)		0,756 €/Antriebs-kWh (ohne USt. 0,653 €/Antriebs-kWh)
Wasserstoff ₂₀₂₂ 700 bar	13,85 €/kg --> 0,412 €/kWh (ohne USt. 11,60 €/kg → 3,492 €/kWh)		0,815 €/Antriebs-kWh (ohne USt. 0,685 €/Antriebs-kWh)
		51 %	
Wasserstoff (= Strom - Haushaltkunde ₂₀₂₁ → 0,32 €/kWh)	7,20 €/kg --> 0,216 €/kWh		0,424 €/Antriebs-kWh
Wasserstoff (= Strom - Haushaltkunde ₂₀₂₃ → 0,40 €/kWh)	8,83 €/kg --> 0,265 €/kWh		0,519 €/Antriebs-kWh
Wasserstoff (= Strom <30.000 kWh ₂₀₂₃ → 0,336 €/kWh)	7,42 €/kg (ohne USt.) --> 0,223 €/kWh		0,437 €/Antriebs-kWh (ohne USt.)

Wasserstoff (= Gewerbekunde₂₀₂₃ → 0,235 €/kWh) Strom	5,19 €/kg (ohne USt.) --> 0,156 €/kWh		0,305 €/Antriebs- kWh (ohne USt.)
Wasserstoff (= Industriekunde₂₀₂₃ → 0,185 €/kWh) Strom	4,08 €/kg (ohne USt.) --> 0,123 €/kWh		0,240 €/Antriebs- kWh (ohne USt.)
Synthetischer Diesel ₂₀₂₁	2,78 bis 4,5 €/l (Dena & LBST 2017: 9; Heinzmann, Glöser- Chahoud, Dahmen et al. 2021: 69; Jacob 2019: 164) → 0,284 bis 0,459 €/kWh ⁵⁵ → Mittelwert 0,3715 €/kWh bzw. ohne USt. 0,3122 €/kWh		1,238 €/Antriebs- kWh (ohne USt. 1,04 €/Antriebs-kWh)
Synthetischer Diesel ₂₀₃₀	2,31 bis 3,13 €/l (Agora Energiewende, Agora Verkehrswende & Frontier Economics 2018; IWES 2017; Wuppertal Institut 2019: 12– 13) → Mittelwert 2,72 €/l → 0,277 €/kWh		0,924 €/Antriebs- kWh (ohne USt. 0,777 €/Antriebs-kWh)
Synthetischer Diesel ₂₀₅₀	1,73 bis 2,43 €/l (Agora Energiewende, Agora Verkehrswende & Frontier Economics 2018; Dena & LBST 2017: 9; IWES 2017; Wuppertal Institut 2019: 12– 13) → Mittelwert 2,08 €/l → 0,212 €/kWh	30 %	0,706 €/Antriebs- kWh (ohne USt. 0,593 €/Antriebs-kWh)
Diesel ₂₀₂₁	1,399 €/l --> 0,1428 €/kWh (en2x 2022)		0,476 €/Antriebs- kWh (ohne USt. 0,400 €/Antriebs-kWh)
Benzin ₂₀₂₁ (E5)	1,579 €/l --> 0,1858 €/kWh (en2x 2022)		0,619 €/Antriebs- kWh

⁵⁵ Bei einem Energiegehalt für Diesel von 9,8 kWh/l.
XXI

		(ohne USt. 0,521 €/Antriebs-kWh)
Diesel₂₀₂₂	1,9604 €/l --> 0,2 €/kWh (en2x 2022)	0,667 €/Antriebs-kWh
		(ohne USt. 0,560 €/Antriebs-kWh)
Benzin₂₀₂₂ (E5)	1,9259 €/l --> 0,2266 €/kWh (en2x 2022)	0,755 €/Antriebs-kWh
		(ohne USt. 0,635 €/Antriebs-kWh)

Umrechnungsfaktor Diesel: 1 l Diesel = 9,8 kWh

Umrechnungsfaktor Benzin: 1 l Benzin = 8,5 kWh

Umrechnungsfaktor Wasserstoff: 1 kg H₂ = 33,33 kWh

Bezüglich der Strompreise₂₀₂₃: Die zuzüglichen Netzentgelte, Steuern, Abgaben und Umlagen exklusive Umsatzsteuer und exklusive der abgeschafften EEG-Umlage betragen 2021 +0,1057 € für Gewerbekunden (50 MWh/Jahr) (BNetzA 2022: 284) und +0,0555 € für Industriekunden (24 GWh/Jahr) (BNetzA 2022: 281). Unter der Annahme, dass diese zusätzlichen Netzentgelte, Steuern, Abgaben und Umlagen zukünftig in etwa der Dimension von 2021 entsprechen und die Strompreisbremse als längerfristiger Zielpreis für den Strompreis verstanden wird, sodass die Zusatzkosten für die restlichen 30 % ignoriert werden können, wird für die folgende Untersuchung ein Strompreis von 0,235 € für Gewerbekunden (50 MWh/Jahr) und von 0,185 € für Industriekunden (24 GWh/Jahr) angenommen.

Bezüglich des synthetischen Diesels_{2030/2050}: Unter der vereinfachten Annahme, dass 2030/2050 die Energiesteuer (0,4704 €/L) und die Umsatzsteuer (19 %) gleichbleiben und es keine weiteren Kosten (wie bspw. Transport- und Verkaufskosten oder die aktuell noch vorhandene CO₂-Abgabe etc.) geben wird.

Annahmen:

- Aufbauend auf den Wirkungsgraden aus Kapitel 3 „Technologien der Antriebswende“ und der dort enthaltenden Vereinfachungen bezüglich Transport- & Speicherverluste (siehe auch Fußnote 10)
- Keine Steigerung der Antriebseffizienz durch Rekuperation.
- Nur indirekte Kosten für den Ladesäulen- oder Tankstellenbetrieb (Fokus auf die Energie-Kosten)
- Annahme Strompreisbremse ist die Zielpreise für die nächsten Jahre -> die Begrenzung auf 70 % bzw. 80 % des Vorjahresverbrauchs wird ignoriert

B. Tabelle Erlös THG-Minderungsquote

	2023		2026		2030	
	In €/kWh	In €/Antr iebs- kWh	In €/kWh	In €/Antri ebs- kWh	In €/kWh	In €/Antri ebs- kWh
Netzstrom (öffentliche Ladesäule)	0,16 €/kWh	0,12 €/Antr iebs- kWh	0,22 €/kWh	0,17 €/Antri ebs- kWh	0,26 €/kWh	0,20 €/Antri ebs- kWh
PV-Strom (Direktleitung an öffentliche Ladesäule)	0,39 €/kWh	0,30 €/Antr iebs- kWh	0,38 €/kWh	0,29 €/Antri ebs- kWh	0,33 €/kWh	0,25 €/Antri ebs- kWh
Onshore-Wind-Strom (Direktleitung an öffentliche Ladesäule)	0,41 €/kWh	0,32 €/Antr iebs- kWh	0,40 €/kWh	0,31 €/Antri ebs- kWh	0,34 €/kWh	0,26 €/Antri ebs- kWh
Offshore-Wind-Strom (Direktleitung an öffentliche Ladesäule)	0,42 €/kWh	0,32 €/Antr iebs- kWh	0,40 €/kWh	0,31 €/Antri ebs- kWh	0,34 €/kWh	0,26 €/Antri ebs- kWh
Grüner Wasserstoff ⁵⁶ (öffentliche Tankstellen)	0,27 €/kWh bzw. 9,06 €/kg	0,14 €/Antr iebs- kWh	0,26 €/kWh bzw. 8,55 €/kg	0,13 €/Antri ebs- kWh	0,22 €/kWh bzw. 7,23 €/kg	0,11 €/Antri ebs- kWh
Synthetisches Methan ⁵⁷ (öffentliche Tankstellen)	0,27 €/kWh		0,26 €/kWh		0,22 €/kWh	
		2023		2026		2030
		€/Fahrzeug		€/Fahrzeug		€/Fahrzeug
Fahrzeug Allgemein Strom (2.000 kWh)		316,60 €		439,70 €		521,37 €
Fahrzeug N1 Strom (3.000 kWh)		474,90 €		659,55 €		782,05 €
Fahrzeug M3 Strom (72.000 kWh)		11.397,59 €		15.829,18 €		18.769,26 €

⁵⁶ Vollständig durch nicht-biogene erneuerbare Energien gespeisten Elektrolyse

⁵⁷ Sabatier-Prozess mit Wasserstoff aus der durch nicht-biogene erneuerbare Energien gespeisten Elektrolyse

Fahrzeug Allgemein Wasserstoff (2.000 kWh)	537,40 €	513,01 €	433,74 €
Fahrzeug N1 Wasserstoff (3.000 kWh)	806,10 €	769,51 €	650,61 €
Fahrzeug M3 Wasserstoff (72.000 kWh)	19.346,38 €	18.468,31 €	15.614,60 €

Annahmen:

- Berechnung gemäß § 37a BImSchG, inspiriert von (GreenTax 2021b, 2021a)
- Preis THG-Emissionszertifikat 450 €/t CO₂-Äq
- Keine Vertriebskosten der THG-Emissionsminderungszertifikate
- Lineare Senkung der THG-Emissionen des Strommix entsprechend der Klimaziele bis 2030
- THG-Emissionen Photovoltaik, Wind an Land/auf See bleiben konstant gemäß (UBA 2022a)
- Höhe des kWh-Jahresverbrauchs für Batterie^{FZ} (und analog angenommen für Brennstoffzellen^{FZ} und E-Fuel^{FZ}) gemäß Schätzwertes der anrechenbaren energetischen Menge elektrischen Stroms für ein reines Batterieelektrofahrzeug (BMUV 2021)

Anmerkung:

Die Anrechnung von Strom für Elektrofahrzeuge ist in der 38. BImSchV geregelt, die Anrechnung strombasierter Kraftstoffe in der 37. BImSchV. Bezüglich der 37. BImSchV wird im Jahr 2023 eine Anpassung entsprechend des delegierten Rechtsakts der europäischen Kommission gemäß Art. 27 Abs. 3 UAbs. 7 Erneuerbare-Energien-Richtlinie bezüglich grünen Wasserstoffs erwartet.

C. Antriebswende in den verschiedenen Fahrzeugklassen

Die Klasse PKW (Fahrzeugklasse M1) ist mit 60,6 % der THG-Emissionen der größte Emittent im straßenbasierten Verkehr (EEA 2022: 18). Entsprechend dem Energieeffizienz-Leitgedanken werden im straßenbasierten Verkehr im Bereich der PKW Batterie^{FZ} als zu präferierende und durchsetzende Lösung gesehen, die auch schon bezüglich geringerer Anschaffungs- als auch Betriebskosten ökonomisch im Vorteil ist (BDI 2021: 32; Dena 2021: 164; Fraunhofer ISI 2021c: 62; Kopernikus-Projekt Ariadne 2021: 62; SRU 2021: 61; Öko-Institut 2021: 48; Prognos, Öko-Institut, & Wuppertal-Institut 2021b: 76–79; Specht & Fabianek 2022; Nationaler Wasserstoffrat 2023: 2–3). Teilweise werden aber auch für den PKW sinnvolle Brennstoffzellen^{FZ}-Einsatzpotentiale bei geringen Standzeiten und häufigen Fernfahrten gesehen (DLR 2020: 6–8) wie bspw. Taxis (Hydrogen Council & McKinsey & Company 2021: 26–28) oder off-road Anwendungen (Liebreich 2021). So ist unklar, ob und welche Rolle Wasserstoff als Brennstoffzellen^{FZ} oder E-Fuels^{FZ} in dem Bereich spielen wird. Die Prognosen gehen dabei von einer Nischenrolle (BDI 2021: 16; Fraunhofer ISI 2021c: 33), einem Verbot von E-Fuels^{FZ} durch das Fossil^{FZ} Neuzulassungsverbot der EU ab 2035 (siehe Kapitel 4.2) bis zu einem Bedeutungsgewinn in den 2030er Jahren (Dena 2021: 164) als notwendige Alternative für Verbrenner-Restbestände und Oldtimer (Kopernikus-Projekt Ariadne 2021: 62). Herstellerseitig entwickeln manche PKW-Hersteller weiterhin Brennstoffzellen^{FZ} für den europäischen Markt (Hyundai und Toyota), andere Hersteller sind aus der Forschung ausgestiegen (VW, Mercedes-Benz).

Im straßenbasierten Verkehr im Bereich der LNF (Leichte Nutzfahrzeuge = Fahrzeuge mit

einem maximal zulässigen Gesamtgewicht von 3,5 Tonnen/ Fahrzeugklasse (N1)) werden insbesondere im städtischen und regionalen Lieferverkehr zumeist Batterie^{FZ} als zu präferierende und die sich durchsetzende Lösung gesehen (bspw. (BDI 2021: 117; Dena 2021: 258; Fraunhofer ISI 2021c: 62; Kopernikus-Projekt Ariadne 2021: 72; Öko-Institut 2021: 40; Prognos, Öko-Institut, & Wuppertal-Institut 2021b: 79–80; SRU 2021: 61; UBA 2019: 230; Ueckerdt, Bauer, Dirnacher et al. 2021: 391; Wuppertal Institut 2020: 85), teilweise auch schon unter den derzeitigen regulatorischen Rahmenbedingungen (Agora Verkehrswende 2020: 95; BMVI 2020: 9; NPM - AG 1 2020: 17; Öko-Institut & HHN 2020: 45–46). Gleichzeitig steigert sich durch tendenziell geringere Standzeiten und häufigere Fernfahrten das Einsatzpotential von Brennstoffzellen^{FZ} für Nischenanwendungen (BMVI 2020: 19; DLR 2020: 6–8; Fraunhofer ISI 2021c: 63; NPM - AG 2 2020: 46). E-Fuels^{FZ} der Klasse N1 wären von einem möglichen M1-Neuzulassungsverbot ab 2035 für E-Fuels^{FZ} vermutlich auch betroffen. Als LNF entwickeln auch andere Hersteller vermehrt Brennstoffzellen^{FZ} für den europäischen Markt (Peugeot, Renault, Citroen und Opel).

Im straßenbasierten Verkehr im Bereich der SNF (schweren Nutzfahrzeuge = Fahrzeuge zur Güterbeförderung mit einer zulässigen Gesamtmasse von mehr als 3,5 Tonnen bis zu 12 Tonnen (N2) bzw. Fahrzeuge zur Güterbeförderung mit einer zulässigen Gesamtmasse von mehr als 12 Tonnen (N3)) ist es aufgrund der längeren Fahrstrecken, anspruchsvolleren Nutzlastprofilen und höheren Kostendrucks unklar, welche Antriebsart hier sinnvoll ist und sich durchsetzen wird (Kluschke, Gnann, Plötz et al. 2019; Agora Verkehrswende 2020: 95;

BMVI 2020: 10–11; NPM - AG 1 2020: 35; Agora Energiewende & Guidehouse 2021: 9–10; Prognos, Öko-Institut, & Wuppertal-Institut 2021b; SRU 2021: 75-76; Nationaler Wasserstoffrat 2023: 3–5). Teilweise wird für Lkw bis 12 t zulässiges Gesamtgewicht Batterie^{FZ} als der sich durchsetzende Fahrzeugtyp gesehen (UBA 2019: 230). Tendenziell wird der Batterie^{FZ}-LKW eher auf Kurz- und Mittelstrecke gesehen und der Brennstoffzellen^{FZ} auf Fernstrecke, während andere in allen Segmenten Anteile von Batterie^{FZ} bzw. Oberleitung^{FZ}-Fahrzeuge sehen. Der Erfolg von Batterie^{FZ} im Güterfernverkehr (Jahresfahrleistung > 100.000 km) ist insbesondere abhängig von weiteren Fortschritten bei der spezifischen Energie der Batteriesysteme, der Zyklenfestigkeit der Batterien für tägliche Ladevorgänge, von einer flächendeckenden Verfügbarkeit von (Schnell-) Ladeoptionen während gesetzlich vorgeschriebener Lenkpausen (Öko-Institut 2021: 40) sowie der Entwicklung der Feststoffbatterie (BDI 2021: 117). Dabei wird zukünftig von einem Trade-off zwischen energieoptimierten Zellen (hohe Kapazität) und leistungsoptimierten Zellen (Schnellladefähigkeit) ausgegangen (Öko-Institut & HHN 2020: 47–48). Teilweise wird eine weitgehende Elektrifizierung des Schwerlastverkehrs durch die Installation eines Oberleitungsnetzes von 2.500 bis 4.000 km der nationalen Autobahnen als primäre Strategie gefordert, insbesondere für Sattelkraftfahrzeuge (Agora Verkehrswende 2020: 95; NPM - AG 2 2020: 18; SRU 2021: 75–76; Wuppertal Institut 2020: 74–85), deren ökonomische Umsetzbarkeit aber umstritten ist (NPM - AG 2 2020: 19; Öko-Institut & HHN 2020: 52-53; SRU 2021: 75–76). Zum Teil wird hier (in einigen Fällen auch in Ergänzung zum Oberleitungsnetz) auf Brennstoffzellen^{FZ} gesetzt, insbesondere bei Anwendungen mit erhöhter Anforderung an

XXVII

die Reichweite ohne Zwischenladung/-betankung (DLR 2020: 10; NPM - AG 2 2020: 19; Wuppertal Institut 2020: 74). Je nach Szenario wird auch ein größerer Anteil von Brennstoffzellen^{FZ} bzw. E-Fuels^{FZ} im SNF-Bereich gesehen (bspw. rund 40 % Brennstoffzellen^{FZ}) (Dena 2021: 259; Fraunhofer ISI 2021c: 63; Kopernikus-Projekt Ariadne 2021: 72). Brennstoffzellen^{FZ} bzw. E-Fuels^{FZ} Lösungen sind auch insbesondere bei off-grid Anwendungen interessant, bei denen ein Strom-Ladevorgang erheblichen Aufwand bedeuten würde, bspw. Baustellenfahrzeuge wie Planiertrauben in nicht ans Strom-Netz angeschlossenen gebieten (Liebreich 2021). Ein LKW mit geringer Fahrleistung kann als ICEsyn Kostenvorteile gegenüber einem Brennstoffzellen^{FZ} haben (Öko-Institut 2021: 65-66). Durch die fortschreitende Technologiereife und bei deutlicher Kostendegression wird eine höhere Bedeutung des Brennstoffzellen^{FZ}-LKW bereits ab Ende der 2020er gesehen (Dena 2021: 164). Andere Studien sehen das Problem, dass voraussichtlich 2027 eine erste Generation Brennstoffzellen^{FZ} mit einer zweiten Generation Batterie^{FZ} konkurrieren müsste und durch diesen technologischen Nachteil nicht durchsetzen werde (Plötz 2022). So wird der Batterie^{FZ}-Marktanteil bei LKW Neuzulassungen für den Fernverkehr im Jahr 2030 teilweise bei 99,5 % (Agora Verkehrswende 2022: 13). Die Hemmnisse für Batterie^{FZ}-LKW werden weniger in den techno-ökonomischen Aspekten gesehen, sondern wenn eher in einer mangelnde Fahrzeugverfügbarkeit und individuellen Konfigurierbarkeit von Fahrzeugen sowie die Installation und der Netzanschluss von betrieblicher Ladeinfrastruktur (ifeu 2021). Im Bereich der SNF entwickeln beispielsweise Hyundai, Daimler Trucks, MAN Truck, Scania oder NIKOLA eigene Batterie^{FZ} und Brennstoffzellen^{FZ}-Modelle,

andere Unternehmen wie FAUN oder Clean Logistics rüsten bestehende Fahrzeuge um.

Im straßenbasierten Verkehr im Bereich der Personenbeförderung (Fahrzeuge zur Personenbeförderung mit mehr als acht Sitzplätzen außer dem Fahrersitz und einer zulässigen Gesamtmasse bis zu 5 Tonnen (M2) bzw. Fahrzeuge zur Personenbeförderung mit mehr als acht Sitzplätzen außer dem Fahrersitz und einer zulässigen Gesamtmasse von mehr als 5 Tonnen (M3)) gibt es aufgrund der längeren Fahrstrecken, anspruchsvolleren Nutzlastprofilen auch im urbaneren Raum und höheren Kostendrucks neben primär Batterie^{FZ} ebenso Einsatzpotentiale für Brennstoffzellen^{FZ} (NOW GmbH 2021b; NPM - AG 2 2020: 51; Öko-Institut 2021: 52-53). Im Personennahverkehr ist der Vorteil von Brennstoffzellen^{FZ} die einfache Integration in die bisherige Infrastruktur und Einsatzpläne (kurze Betankungsdauer bei langer Nutzungsdauer, höhere Einsatzflexibilität) (DLR 2020: 9-10; Öko-Institut 2021: 52). Teilweise werden im Personennahverkehr auch Oberleitung^{FZ}-Busse (Trolleybusse) in Erwägung gezogen, insbesondere bei schon vorhandenen Oberleitungen (Öko-Institut 2021: 52). Im Personenfernverkehr werden neben Batterie^{FZ} aufgrund der langen täglichen Einsatzzeiten auch Brennstoffzellen^{FZ}-Potentiale gesehen (DLR 2020: 9-10; Öko-Institut 2021: 53).

Im schienenbasierten Güter- und Personenverkehr wird die Elektrifizierung über Oberleitung als die primäre Lösung gesehen (Kopernikus-Projekt Ariadne 2021: 319; SRU 2021: 60). Dies sei jedoch nicht immer ökonomisch sinnvoll. So gibt es je nach Gesamtlänge und Topografie Einsatzpotentiale für Triebzugkonzepte auf Batterie^{FZ}-Basis und Brennstoffzellen^{FZ}-Basis (BDI 2021: 119; Dena 2021; Fraunhofer ISI 2021c: 28; Nationaler Wasserstoffrat 2023: 2;

NPM - AG 2 2020: 43-46; Öko-Institut 2021: 53-54; SRU 2021: 60; VDE 2019). Dies gilt insbesondere im Personenverkehr, da dort durch den Fahrplanbetrieb eine langfristig zuverlässige Abnahme von Wasserstoff gewährleistet werden kann (DLR 2020: 10-11).

Im wasserbasierten Güter- und Personenverkehr gibt es in Nischenanwendungen in der Binnenschifffahrt sowohl erste Batterie^{FZ} als auch Brennstoffzellen^{FZ} Konzepte (Dena 2021: 259; DLR 2020: 11-12; Nationaler Wasserstoffrat 2023: 2; NPM - AG 2 2020: 44). In der Binnenschifffahrt wird eine Elektrifizierung durch Hybridsysteme von beispielsweise 20 % angenommen (Fraunhofer ISI 2021c: 28). Gleichzeitig werden in der internationalen Seeschifffahrt langfristig Flüssigwasserstoff oder aus Wasserstoff hergestellte Kraftstoffe wie Ammoniak, verflüssigtes Methan oder Methanol aufgrund der hohen benötigten volumetrischen Energiedichte für lange Einsatzdauern und der langen Investitionszyklen als aktuell einzige kohlenstofffreie Alternative gesehen (Agora Verkehrswende 2019b: 14-15; Fraunhofer ISI 2021c: 28; Kopernikus-Projekt Ariadne 2021: 319; Nationaler Wasserstoffrat 2023: 1-2; NPM - AG 2 2020: 43-46; Öko-Institut 2021: 62-63; SRU 2021: 60; UBA 2019: 230; Ueckerdt, Bauer, Dirnaichner et al. 2021: 391; Wuppertal Institut 2020: 74).

Im luftbasierten Güter- und Personenverkehr gibt es in Nischenanwendungen auf der Kurzstrecke sowohl erste Batterie^{FZ} als auch Brennstoffzellen^{FZ} Konzepte (DLR 2020: 12; NPM - AG 2 2020: 44; SRU 2021: 60). So werden im nationalen Bereich Batterie^{FZ}-Flugzeuge gefordert (Fraunhofer ISI 2021c: 13). Gleichzeitig wird auf Langstrecken die Verbrennung von strombasiertem Kerosin oder Wasserstoff aufgrund der benötigten

hohen volumetrischen Energiedichten für lange Einsatzdauern und der langen Investitionszyklen als aktuell einzige Alternative gesehen (Agora Verkehrswende 2019b: 14–15; BDI 2021: 121–122; Dena 2021: 259; DLR 2020: 12; Fraunhofer ISI 2021c: 28; Kopernikus-Projekt Ariadne 2021: 6; Nationaler Wasserstoffrat 2023: 2; NPM - AG 2 2020: 46; Öko-Institut 2021: 60–62; Prognos, Öko-Institut, & Wuppertal-Institut 2021b: 107; SRU 2021: 60-61, 2021: 75–76; UBA 2019: 230; Ueckerdt, Bauer, Dirnaichner et al. 2021: 391; Wuppertal Institut 2020: 74).

Dabei gilt es zu beachten, dass synthetisches Kerosin auf Direct Air Capture Basis nicht unbedingt THG-neutral ist, da CO₂ in der Atmosphäre einen höheren Strahlungsantrieb hat (McKinsey & Company 2020: 21) sowie weitere THG mit Klimawirkung wie NO_x ausgestoßen werden (Lee, Fahey, Skowron et al. 2021). Es wird davon ausgegangen, dass nur 33 % der THG-Emissionen eines Langstreckenflugs durch synthetische Kraftstoffe reduziert werden kann (Scientist for Future 2022: 12).

D. Tabelle Angenommene Energie-Verbräuche für verschiedene Fahrzeugklassen

		Diesel	Batterie ^{FZ}	Brennstoffzellen ^{FZ}
		Wirkungsgrad	Wirkungsgrad	Wirkungsgrad
		30 %	77 %	51 %
	Bedarf in kWh/100 km	Verbrauch in l Kraftstoff (Diesel) /100 km	Verbrauch in kWh / 100 km	Verbrauch in kg Wasserstoff / 100 km
Krafträder	12,23	4,16	14,39	0,72
Personenkraftwagen	21,44	7,29	25,22	1,26
Linienbus	119,35	40,60	140,41	7,02
Fernlinienbus	88,02	29,94	103,56	5,18
Sonstige Reisebusse	88,02	29,94	103,56	5,18
Lastkraftwagen mit zulässiger Gesamtmasse bis 3.500 kg	24,60	8,37	28,94	1,45
Lastkraftwagen 3.501 bis 7.500 kg	39,30	13,37	46,24	2,31
Lastkraftwagen 7.501 bis 12.000 kg	54,00	18,37	63,53	3,18
Lastkraftwagen 12.001 und mehr kg	76,80	26,12	90,35	4,52
Sattelzugmaschinen	90,90	30,92	106,94	5,35
land-/forstwirtschaftliche Zugmaschinen	90,90	30,92	106,94	5,35
sonstige Zugmaschinen	90,90	30,92	106,94	5,35
Sonstige Kfz	39,30	13,37	46,24	2,31

Dabei ist zu beachten, dass Faktoren wie Mehrverbrauch durch Mehrgewicht (z. B. Batterie), Wenigerverbrauch durch Rekuperation oder Effizienzsteigerung Antrieb nicht berücksichtigt wurden.

Annahme Bedarfsabschätzung:

- Lineare Projektion der KBA Daten (Anzahl Fahrzeuge auf Kreis-Ebene und durchschnittliche Jahresfahrleistung nach Fahrzeugtyp) aus der Vergangenheit in die Zukunft (KBA 2022b, 2022a) Allgemein ist die Entwicklung bezüglich Personen/Tonnenkilometern je nach Studie unterschiedlich.
- Anteil der alternativen Antriebe gemäß der politischen Ziele 2030 (15 Millionen PKWs, in allen anderen Fahrzeugklassen 33,33 %) (BMU 2019: 80; SPD, BÜNDNIS 90 / DIE GRÜNEN & FDP 2021: 27).
- Verteilung der alternativen Antriebe (Batterie^{FZ} / Brennstoffzellen^{FZ}) gemäß (Prognos, Öko-Institut, & Wuppertal-Institut 2021a, 2021b; UBA 2020a)

E. Tabelle Gesamtsystemische Studien: Bedarf an Strom, H₂ und PtL im Verkehrssektor 2030, 2035 & 2045

Sektor Verkehr		2030		2045	
		Absolut in TWh/a	Relativ zu Verkehrssektor	Absolut in TWh/a	Relativ zu Verkehrssektor
(Brutto-) Strombedarf Verkehrssektor in TWh/a	Klimapfade 2.0	k. A.	/	k. A.	/
	Langfristszenarien für die Transformation des deutschen Energiesystems (T45-Strom)	62 TWh	/	186 TWh	48 %
	Langfristszenarien für die Transformation des deutschen Energiesystems (T45-H ₂)	93 TWh	/	123 TWh	29 %
	Leitstudie Aufbruch Klimaneutralität	55 TWh	82 %	110 TWh	36 %
	Klimaneutrales Deutschland 2045	74 TWh	94 %	175 TWh	52 %
	Ariadne Report (Technologie-Mix REMod)	55 TWh	89 %	195 TWh	43 %
	H ₂ -Bedarf Verkehrssektor in TWh/a	Klimapfade 2.0	11 TWh	/	21 TWh
Langfristszenarien für die Transformation des deutschen Energiesystems (T45-Strom)		0 TWh	0 %	19 TWh	5 %
Langfristszenarien für die Transformation des deutschen Energiesystems (T45-H ₂)		8 TWh	/	111 TWh	27 %
Leitstudie Aufbruch Klimaneutralität		8 TWh	8 %	59 TWh	25 %
Klimaneutrales Deutschland 2045		4 TWh	6 %	39 TWh	13 %
Ariadne Report (Technologie-Mix REMod)		5 TWh	6 %	91 TWh	27 %

Sektor Verkehr		2030		2045	
		Absolut in TWh/a	Relativ zu Verkehrssektor	Absolut in TWh/a	Relativ zu Verkehrssektor
Power-to-Liquid- (PtL) -Bedarf Verkehrssektor in TWh/a	Klimapfade 2.0	39 TWh	/	123 TWh	/
	Langfristszenarien für die Transformation des deutschen Energiesystems (T45-Strom)	(Benzin, Diesel und Methan wird nicht in fossil/syn. unterschieden): 504 TWh	/	183 TWh	47 %
	Langfristszenarien für die Transformation des deutschen Energiesystems (T45-H2)	(Benzin, Diesel und Methan wird nicht in fossil/syn. unterschieden) 514 TWh	/	184 TWh	44 %
	Leitstudie Aufbruch Klimaneutralität	4 TWh	6 %	138 TWh	45 %
	Klimaneutrales Deutschland 2045	1 TWh	1 %	120 TWh	36 %
	Ariadne Report (Technologie-Mix REMod)	2 TWh	3 %	164 TWh	36 %

		Gesamtsystem	2030	2045
(Brutto-) Strombedarf Gesamt in TWh/a	Klimapfade 2.0 (Netto-Verbrauch)		722 TWh	993 TWh
	Langfristszenarien für die Transformation des deutschen Energiesystems (T45-Strom)		763 TWh	1296 TWh
	Langfristszenarien für die Transformation des deutschen Energiesystems (T45-H2)		779 TWh	1242 TWh
	Leitstudie Aufbruch Klimaneutralität		698 TWh	910 TWh
	Klimaneutrales Deutschland 2045		643 TWh	1017 TWh
	Ariadne Report (Technologie-Mix, REMod)		740 TWh	1117 TWh
H₂-Bedarf Gesamt in TWh/a	Klimapfade 2.0		43 TWh	237 TWh
	Langfristszenarien für die Transformation des deutschen Energiesystems (T45-Strom)		27 TWh	363 TWh
	Langfristszenarien für die Transformation des deutschen Energiesystems (T45-H2)		72 TWh	694 TWh
	Leitstudie Aufbruch Klimaneutralität		39 TWh	226 TWh
	Klimaneutrales Deutschland 2045		63 TWh	265 TWh
	Ariadne Report (Technologie-Mix REMod)		76 TWh	376 TWh

(BDI 2021; Dena 2021; Prognos, Öko-Institut, & Wuppertal-Institut 2021b; Fraunhofer ISI 2021b; Kopernikus-Projekt Ariadne 2021).

Impressum

Verantwortlich

Prof. Dr. Jens-Eric von Düsterlho
Dekan Fakultät Wirtschaft & Soziales,
Professor Allgemeine Betriebswirtschaftslehre,
Leitung Teilprojekt „Markt- & Geschäftsmodelle“
(NRL AG 5)

CC4E/HAW Hamburg
Raum 9.18
Berliner Tor 5
20099 Hamburg

E-Mail: studie@norddeutsches-reallabor.de

Autor*innen

Jonas Bannert (HAW Hamburg)
Wissenschaftlicher Mitarbeiter NRL AG 5

Britta Heybrock (HAW Hamburg)
Studentische Mitarbeiterin NRL AG 5

CC4E/HAW Hamburg
Steindamm 96
20099 Hamburg



Das CC4E

Das Competence Center für Erneuerbare Energien und EnergieEffizienz (CC4E) ist eine zentrale wissenschaftliche Einrichtung der Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg (HAW Hamburg). Entwickelt werden praxisnahe Lösungen für ein breites Spektrum an technologischen, gesellschaftlichen, politischen und wirtschaftlichen Problemstellungen – von der Idee bis zur Umsetzung.

Zum Projekt:

Norddeutsches Reallabor

Das Norddeutsche Reallabor (NRL) ist ein innovatives Verbundprojekt, das neue Wege zur Klimaneutralität aufzeigt. Dazu werden Produktions- und Lebensbereiche mit besonders hohem Energieverbrauch schrittweise defossilisiert – insbesondere in der Industrie, aber auch in der Wärmeversorgung und dem Mobilitätssektor. Hinter dem im April 2021 gestarteten Projekt steht eine wachsende Energiewende-Allianz mit mehr als 50 Partnern aus Wirtschaft, Wissenschaft und Politik. Das Großprojekt hat eine Laufzeit von fünf Jahren (04/2021-03/2026). Dabei beträgt das Investitionsvolumen der beteiligten Partner rund 405 Mio. Euro. Als Teil der Förderinitiative „Reallabore der Energiewende“ wird das Projekt mit rund 55 Mio. Euro durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) gefördert. Weitere Fördermittel werden durch das Bundesministerium für Digitales und Verkehr (BMDV) bereitgestellt. Das NRL versteht sich als ausbaufähige Plattform für weitere Projekte.

Webseite: www.norddeutsches-reallabor.de

LinkedIn: <https://de.linkedin.com/showcase/norddeutsches-reallabor>

