



Klimabilanz von strombasierten Antrieben und Kraftstoffen



Impressum

Klimabilanz von strombasierten Antrieben und Kraftstoffen

ERSTELLT IM AUFTRAG VON

Agora Verkehrswende

Anna-Louisa-Karsch-Str. 2 | 10178 Berlin
T +49 (0)30 700 14 35-000
F +49 (0)30 700 14 35-129
www.agora-verkehrswende.de
info@agora-verkehrswende.de

PROJEKTLEITUNG

Kerstin Meyer
kerstin.meyer@agora-verkehrswende.de

DURCHFÜHRUNG

ifeu – Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg GmbH

www.ifeu.de

Autoren:

Für ifeu: Hinrich Helms, Horst Fehrenbach, Dr.-Ing.
Kirsten Biemann, Claudia Kämper, Udo Lambrecht,
Julius Jöhrens
Für Agora Verkehrswende: Kerstin Meyer

Korrektur: Eva Beré

Satz/Grafik: Marica Gehlfuß, Agora Verkehrswende

Titelbild: iStock/gehringj

DANKSAGUNG

Im Rahmen des Projekts wurden im September 2019 ein Workshop mit Beteiligten aus Wirtschaft, Wissenschaft, Zivilgesellschaft, Ministerien und nachgeordneten Behörden durchgeführt. Dieser Workshop diente als Informations- und Diskussionsplattform für die vorliegende Untersuchung. Wir bedanken uns bei den Teilnehmerinnen und Teilnehmern für Ihre fachliche Expertise und die konstruktive Diskussion. Die Schlussfolgerungen und Ergebnisse dieser Veröffentlichung spiegeln jedoch nicht notwendigerweise die Meinungen der Workshop-teilnehmer wider. Die Verantwortung für die Ergebnisse liegt ausschließlich bei Agora Verkehrswende und beim ifeu – Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg GmbH.



**Unter diesem QR-Code steht diese
Publikation als PDF zum Download
zur Verfügung.**

Veröffentlichung: Dezember 2019
32-2019-DE

Bitte zitieren als:

Agora Verkehrswende (2019): *Klimabilanz von strombasierten Antrieben und Kraftstoffen.*

Zentrale Ergebnisse

- 1 Damit Klimabilanzen von strombasierten Antrieben und Kraftstoffen vergleich- und belastbare Ergebnisse liefern, muss sichergestellt werden, dass gleiche Annahmen zur Energiebereitstellung getroffen werden. Deshalb wird in dieser Studie für alle strombasierten Antriebe und Kraftstoffe der gleiche Strommix angenommen.
- 2 In der Klimabilanz eines Brennstoffzellenfahrzeugs, das mit elektrolytisch hergestelltem Wasserstoff aus deutschem Strommix betrieben wird, liegen die Treibhausgasemissionen 75 Prozent über denen eines Batteriefahrzeugs mit 35 kWh Batteriekapazität. Beim Vergleich mit einem Batteriefahrzeug mit 60 kWh im reinen Autobahnbetrieb liegen die Emissionen um 56 Prozent darüber. Das Fortschreiten der Energiewende im Stromsektor ist hier gleichermaßen mit eingerechnet. Im Vergleich zu einem Dieselfahrzeug der Kompaktklasse liegen die Treibhausgasemissionen etwa 50 Prozent höher.
- 3 In der Klimabilanz eines Fahrzeugs mit Verbrennungsmotor, das mit strombasierten Flüssigkraftstoffen aus deutschem Strommix betrieben wird, sind die Treibhausgasemissionen rund drei Mal so hoch wie die des Batteriefahrzeugs mit 35 kWh. Das Fortschreiten der Energiewende im Stromsektor ist hier gleichermaßen mit eingerechnet. Im Vergleich zu einem Dieselfahrzeug der Kompaktklasse sind die Treibhausgasemissionen eines Verbrenner-Pkw mit strombasierten Flüssigkraftstoffen etwa zweieinhalb Mal so hoch.
- 4 Sollen Wasserstoff oder strombasierte Kraftstoffe im Verkehr einen Klimaschutzbeitrag leisten, so muss sichergestellt werden, dass bei ihrer Produktion ausschließlich Wind- oder Solarstrom aus zusätzlichen Kapazitäten verwendet wird. Vor dem Hintergrund beschränkter zusätzlicher inländischer Kapazitäten ist davon auszugehen, dass klimaneutrale strombasierte Kraftstoffe im Ausland hergestellt werden.
- 5 Die Klimabilanz eines mit Erdgas betriebenen Pkw der Kompaktklasse ist über den gesamten Lebenszyklus nur unwesentlich besser als die eines Diesel-Pkw. Die Emissionen des Erdgasfahrzeugs sind zirka 14 Prozent höher als die des Batteriefahrzeugs mit 35 kWh Batteriekapazität. Dabei ist jeweils der durchschnittliche Strom- und Gasmix zugrunde gelegt.

Vorwort

Liebe Leserin, lieber Leser,

noch sind Pkw mit batterieelektrischem Antrieb auf unseren Straßen nur selten anzutreffen, doch nach Lage der Dinge wird sich das sehr bald ändern. Der Grund dafür: Die neuen EU-Flottengrenzwerte fordern die Hersteller aufs Schärfste. Wollen sie keine Strafzahlungen riskieren, müssen sie reagieren – auch, indem sie attraktive Elektrofahrzeuge anbieten. Nicht von ungefähr zeigen aktuelle Analysen, dass bis zum Jahr 2025 mehr als 170 batterieelektrische Fahrzeuge auf dem europäischen Markt zu haben sein werden; hinzu kommen noch einmal etwa 100 Modelle mit Plug-in-Antrieb.

Machen also Elektrofahrzeuge den Autos mit herkömmlichen Verbrennungsmotoren – neudeutsch: Internal Combustion Engine (ICE) – ihre Vormachtstellung streitig? „Are we approaching the peak of the ‚ICE age‘?“ Die Internationale Energie Agentur jedenfalls wirft die Frage in ihrem jüngsten World Energy Outlook ganz ernsthaft auf.

Freilich, die vermeintlichen Stars von morgen sind nicht unumstritten. Sie gelten zwar als vorteilhaft, weil sie keinen Auspuff haben und weder Schadstoffe noch klimaschädliches Kohlendioxid (CO₂) emittieren. Tatsächlich haben sie dennoch einen nicht zu übersehenden CO₂-Fußabdruck: Zunächst einmal steckt er im Fahrstrom, solange der nicht ausschließlich regenerativ hergestellt wird – und natürlich in den Batterien, deren Herstellung viel Energie beansprucht. Die Frage steht deshalb im Raum, wie klimaverträglich die Batteriefahrzeuge tatsächlich sind, nicht nur im Vergleich zu Dieseln, Benzinern und Erdgasfahrzeugen, sondern auch verglichen mit anderen strombasierten Antriebs- und Kraftstoffkonzepten.

Dieser Frage haben wir uns in der vorliegenden Studie gewidmet. Ihr Kern ist ein Vergleich der Klimawirkungen verschiedener strombasierter Antriebe. Dabei haben wir darauf geachtet, dass sämtliche Alternativen vom gleichen Ausgangspunkt starten. Schließlich wäre unsere Untersuchung nicht viel wert, wenn wir bei einem Antriebskonzept die Versorgung mit ausschließlich regenerativem Strom unterstellt hätten, bei einem anderen aber den üblichen Strommix, der noch viel CO₂ enthält.

Angetreten sind batterieelektrische Fahrzeuge, Autos mit Brennstoffzelle und Verbrenner, die allerdings nicht mit fossilem, sondern mit strombasiertem Kraftstoff versorgt werden. Das Ergebnis, wie immer man es dreht und wendet: Batteriefahrzeuge haben heute die beste Klimabilanz, gefolgt von Fahrzeugen mit Brennstoffzelle und Verbrennern, die mit strombasiertem Kraftstoff fahren.

Dennoch hat auch das batterieelektrische Fahrzeug als Klassenbesten noch erhebliche Emissionen. So viele, dass ambitionierte Klimaschutzziele sich nicht erreichen lassen. Wirklich klimaverträglich fahren sie nur, wenn der Strom, der sie antreibt, klimaverträglich hergestellt wurde. Deshalb kommt es jetzt auch darauf an, parallel zum Markthochlauf batterieelektrischer Autos die Energiewende im Stromsektor zum Erfolg zu führen.

Christian Hochfeld

für das Team von Agora Verkehrswende
Berlin, 16. Dezember 2019

Inhalt

Zentrale Ergebnisse	3
Vorwort	4
Abbildungs- und Tabellenverzeichnis	7
Abkürzungsverzeichnis	8
01 Bewertung der zentralen Ergebnisse aus Sicht von Agora Verkehrswende	11
02 Hintergrund, Ziel und Rahmen der Kurzstudie	17
03 Einordnung alternativer Energieträger	21
3.1 Flüssige Biokraftstoffe	21
3.2 Erdgas und Bio-CNG	23
3.3 Wasserstoff, PtG und PtL	24
3.3.1 Voraussetzungen für die Deckung des künftigen Bedarfs an flüssigen oder gasförmigen Kraftstoffen	24
3.3.2 Technologieauswahl	25
04 Zentrale Aspekte der Klimabilanz verschiedener Antriebskonzepte	27
4.1 Fahrzeugherstellung, -wartung und -entsorgung	27
4.1.1 Datengrundlagen	27
4.1.2 Klimawirkung der Fahrzeugherstellung	29
4.2 Klimawirkung der Fahrzeugnutzung	31
4.3 Klimawirkung der Energiebereitstellung	33
4.3.1 Konventionelle Kraftstoffe (Benzin, Diesel, Erdgas)	34
4.3.2 Strom	35
4.3.3 Wasserstoff, PtG und PtL	35
05 Klimabilanz der Fallbeispiele über den gesamten Lebensweg	39
5.1 Ergebnisse für konventionelles und synthetisches Erdgas	40
5.2 Ergebnisse für Brennstoffzelle und synthetischen Kraftstoff	41
06 Literaturverzeichnis	45
07 Anhang Überblick Klimabilanzen von FCEV	51

Abbildungs- und Tabellenverzeichnis

Abbildung 1:	Potenziale an Biokraftstoffen für den Verkehrssektor nach verschiedenen Studien	22
Abbildung 2:	Schematischer Aufbau des Modells zur Fahrzeugherstellung	27
Abbildung 3:	Klimawirkung der Herstellung und Entsorgung der betrachteten Fahrzeugkonzepte	30
Abbildung 4:	Klimawirkungen der Brennstoffzelle (100 kW) nach Komponenten und Materialien	31
Abbildung 5:	In dieser Kurzstudie zusätzlich betrachtete Kraftstoffoptionen	33
Abbildung 6:	Emissionsfaktoren (differenziert nach Well-to-Tank und Tank-to-Wheel) für die Referenzkraftstoffe	34
Abbildung 7:	Stark vereinfachtes Schema der Produktionskette strombasierter Kraftstoffe	36
Abbildung 8:	Gesamtemissionsfaktoren für die Bereitstellung von PtL, PtG und PtH ₂ (well-to-tank) mit drei verschiedenen Stromvorketten	37
Abbildung 9:	Schematische Darstellung der Treibhausgasemissionen eines ICEV und BEV in Abhängigkeit der Lebensfahrleistung	39
Abbildung 10:	Treibhausgasemissionen des Beispielfahrzeugs der Kompaktklasse (ICEV, BEV, CNG (konventionell und PtG)) in gemischter Nutzung über einen Lebensweg 2018 – 2030 in Abhängigkeit von der Lebensfahrleistung	40
Abbildung 11:	Treibhausgasemissionen des Beispielfahrzeugs der Kompaktklasse (ICEV (konventionell und PtL), BEV, FCEV) in gemischter Nutzung über einen Lebensweg 2018 – 2030 in Abhängigkeit von der Lebensfahrleistung	42
Abbildung 12:	Treibhausgasemissionen des Beispielfahrzeugs der Kompaktklasse (ICEV (konventionell und PtL), BEV, FCEV) in Autobahnnutzung über einen Lebensweg 2018 – 2030 in Abhängigkeit von der Lebensfahrleistung	43
Abbildung 13:	Bandbreite der Klimawirkung von Brennstoffzellen-Pkw in der Literatur	51
Tabelle 1:	Fahrzeugeigenschaften ausgewählter CNG-Pkw	28
Tabelle 2:	Marktübersicht Brennstoffzellen-Pkw	28
Tabelle 3:	Verbrauchswerte für ausgewählte Erdgas-Pkw der unteren Mittelklasse	32
Tabelle 4:	Verbrauchswerte für das generische Beispielfahrzeug	33
Tabelle 5:	Literaturüberblick Studien zur Klimawirkung von Brennstoffzellen-Pkw	52
Tabelle 6:	Annahmen und wichtige Ergebnisse der eigenen Modellierung	53

Abkürzungsverzeichnis

ADAC	Allgemeiner Deutscher Automobil-Club
AFID	Alternative Fuels Infrastructure Directive
Äq.	Äquivalent
BEV	Battery Electric Vehicle
B7	konventioneller Dieselmotortreibstoff
BImSchG	Gesetz zum Schutz vor schädlichen Umwelteinwirkungen durch Luftverunreinigungen, Geräusche, Erschütterungen und ähnliche Vorgänge (Bundes-Immissionsschutzgesetz)
BLE	Bundesanstalt für Landwirtschaft und Ernährung
BMWi	Bundesministerium für Wirtschaft und Energie
CFK	karbonfaserverstärkter Kunststoff
CNG	Compressed Natural Gas
DBFZ	Deutsches Biomasseforschungszentrum
DSLV	Deutscher Speditionen- und Logistikverband
E5	konventionelles Benzin
EE	erneuerbare Energien
EEG	Erneuerbare-Energien-Gesetz
EU	Europäische Union
FCEV	Fuel Cell Electric Vehicle
FT	Fischer-Tropsch-Verfahren
Fzg.	Fahrzeug
GFK	glasfaserverstärkter Kunststoff
HDPE	High Density Polyethylene
ICEV	Internal Combustion Engine Vehicle
Ifeu	Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg
kW	Kilowatt
kWh	Kilowattstunde
Li	Lithium
LNG	Liquefied Natural Gas
LPG	Liquefied Petroleum Gas
MEA	Membrane Electrode Assembly
MJ	Megajoule
Nabisy	Nachhaltige-Biomasse-Systeme
NEFZ	Neuer Europäischer Fahrzyklus
NPM AG1	Nationale Plattform Zukunft der Mobilität, Arbeitsgruppe 1
PEMFC	Proton Exchange Membrane Fuel Cell
PHEV	Plug-in-Hybrid Electric Vehicle
PJ	Petajoule
Pkw	Personenkraftwagen
PtG	Power-to-Gas (strombasiertes Gas)
PtH₂	Power-to-H ₂ (strombasierter Wasserstoff)
PtL	Power-to-Liquid (strombasierter Flüssigkraftstoff)
PtX	Power-to-X (Sammelbegriff für alle strombasierten Kraftstoffe)
RED	Renewable Energy Directive
RED II	Renewable Energy Directive II
REEV	Range Extended Electric Vehicles
SNG	Synthetic Natural Gas
SUV	Sport Utility Vehicle

THG	Treibhausgase
TREMOD	Transport Emission Model (des ifeu)
VEHMOD	Vehicle Model (des ifeu)

01 | Bewertung der zentralen Ergebnisse aus Sicht von Agora Verkehrswende

Seit etwa zehn Jahren wird intensiv über Elektromobilität diskutiert, jetzt steht endlich sie kurz vor dem Durchbruch. Die Anfang 2019 von der EU beschlossenen CO₂-Flottengrenzwerte haben die Autohersteller veranlasst, die Herstellung von batterieelektrischen Fahrzeugen und von Plug-In-Hybriden in großem Maßstab in ihre Portfolioplanung zu integrieren. Eine Analyse von Agora Verkehrswende zeigt, dass die deutschen Hersteller für das Einhalten der Grenzwerte in 2020/2021 schon kurzfristig Verkaufsanteile von 8 bis 15 Prozent Elektrofahrzeuge erreichen müssen.¹ Hinsichtlich der angekündigten Modelle gibt es eine bislang ungeahnte Dynamik: Bis 2025 werden über 170 batterieelektrische Modelle auf dem europäischen Markt erwartet.²

Gleichwohl wird in der Öffentlichkeit viel diskutiert, wie sich die Klimabilanz von batterieelektrischen Elektrofahrzeugen (*battery electric vehicle* – BEV) tatsächlich darstellt. Immer wieder taucht dabei die Frage auf, unter welchen Umständen BEVs aus Klimasicht besser abschneiden als vergleichbare Benziner oder Diesel. Auch der Vergleich zu anderen Antriebs- und Kraftstoffformen ist umstritten. Im Raum steht die Frage, ob beispielsweise Brennstoffzellenfahrzeuge (*Fuel Cell Electric Vehicles* – FCEV) oder gasbetriebene Fahrzeuge bessere Alternativen zu Verbrennern sind als batterieelektrische Autos.

Elektromobilität als solches ist nicht auf rein batterieangetriebene Elektrofahrzeuge beschränkt, sondern umfasst unter anderem auch Plug-in-Hybridfahrzeuge (*Plug-in Hybrid Electric Vehicles* – PHEV) und Brennstoffzellenfahrzeuge (*Fuel Cell Electric Vehicles* – FCEV).³ Jede dieser Ausprägungen von Elektromobilität hat im Vergleich zum Verbrennungsmotor Effizienzvorteile und spielt eine Rolle für die Energiewende im Verkehr. Die Studie „Klimabilanz von Elektroautos“ (Agora Verkehrswende 2019b) befasste sich ausschließlich mit batterieelektrischen Elektrofahrzeugen. Die vorliegende Studie erweitert den Untersuchungsgegenstand und nimmt sowohl Brennstoffzellenfahrzeuge als auch gasbetriebene Pkw mit in den Blick. Plug-In-Hybride oder Fahrzeuge mit Range Extender sind nicht Gegenstand

dieser Studie, da die Datenlage zu den mit diesen Pkw tatsächlich elektrisch gefahrenen Fahrzeugkilometern noch nicht ausreichend ist.

Diese Studie ist nicht die erste Veröffentlichung in diesem Themengebiet. In den Jahren 2018 und 2019 wurden mehrere Studien publiziert, die einen Vergleich zwischen unterschiedlichen alternativen Antriebsarten zum Thema haben.⁴ Die Veröffentlichung dieser Studien war des Öfteren von einer kontroversen Diskussion um die Annahmen und Ergebnisse begleitet.⁵ Allen, auch der vorliegenden Studie, ist gemein, dass sie aufgrund der eingangs getroffenen Annahmen nur einen Ausschnitt der Diskussion um alternative Antriebe beleuchten können.

Hinzu kommt: Die hier dargestellten Ergebnisse sind eine Momentaufnahme höchst dynamischer Entwicklungen. Bei der Interpretation der Ergebnisse ist deshalb zu berücksichtigen, dass beispielsweise die Emissionsfaktoren für die Herstellung von Batterien auch niedriger sein könnten; aktuelle Publikationen deuten jedenfalls darauf hin.⁶ Dies bedeutet, die hier – zur Vergleichbarkeit mit der ersten Studie – gleich angesetzten Treibhausgasemissionen der Batterieherstellung liegen mittlerweile möglicherweise bereits niedriger. Eine zentrale Erkenntnis aus der Beschäftigung mit dem Thema Klimabilanz von Elektroautos ist, dass mehr Transparenz bei Batteriedaten notwendig ist. Auch für die Herstellung von PtH₂-, PtG- und PtL-Produkten sind in Zukunft voraussichtlich weitere Verbesserungen der Produktionsprozesse zu erwarten, der Stand der Technik wird sich hier ebenfalls weiterentwickeln. Eine kontinuierliche Betrachtung vergleichender Klimabilanzen, die diesen Entwicklungen Rechnung trägt, ist damit auch in Zukunft geboten.

1 Agora Verkehrswende (2019a).

2 Vgl. Transport & Environment (2019). Zusätzlich dazu werden für 2020 100 Plug-In-Hybrid-Modelle erwartet.

3 Agora Verkehrswende (2017).

4 Frischknecht et al. (2018); Jungmeier et al. (2019); Sternberg et al. (2019); Wietschel et al. (2019).

5 Fraunhofer ISE (2019); Hoekstra, A. (2019).

6 Hoekstra, A. (2019); Regett et al. (2019); Sternberg et al. (2019); Emilsson & Dahlöf (2019).

1.1 Damit Klimabilanzen von strombasierten Antrieben und Kraftstoffen vergleich- und belastbare Ergebnisse liefern, muss sichergestellt werden, dass gleiche Annahmen zur Energiebereitstellung getroffen werden.

Ein Aspekt, der bei der Diskussion um verschiedene Antriebs- und Kraftstoffkombinationen oft außer Acht gelassen wird, ist die technologische Marktreife und kostenseitige Wettbewerbsfähigkeit der verschiedenen Technologieoptionen. Während ein deutlicher Anstieg des Absatzes von batterieelektrischen Fahrzeugen und Plug-In-Hybriden in unmittelbarer Zukunft zu erwarten ist, ist die Technologieentwicklung bei Wasserstoffmobilität noch nicht gleichermaßen weit fortgeschritten. Noch weiter in der Zukunft liegen strombasierte Kraftstoffe, die sich momentan auf dem Stand von Demonstrationsprojekten befinden. Dies entspricht in etwa dem Stand, auf dem die batterieelektrische Mobilität vor etwa fünf bis zehn Jahren war. Auch wenn für Verbraucherinnen und Verbraucher alle diese Optionen gleichermaßen weit in der Zukunft zu liegen scheinen, Technologien als Ergänzung zum batterieelektrischen Antrieb zeitlich gestaffelt zu einem späteren Zeitpunkt erfolgen.

Die Analyse „Klimabilanz von Elektroautos“ hat gezeigt, dass die Energiebereitstellung den wichtigsten Einfluss auf die Ergebnisse der Klimabilanzen hatte. Die nun vorliegende Studie baut auf diesem Ergebnis auf. In vielen Studien werden verschiedene Antriebs- und Kraftstoffkombinationen miteinander verglichen. Insbesondere in der Diskussion um PtX gehen die meisten Studien davon aus, dass für die PtX-Produktion stets Solar- oder Windstrom zum Einsatz kommt.⁷ Bei der Gegenüberstellung der vielen verschiedenen Szenarien gerät allerdings mitunter in Klimabilanzen die Vergleichbarkeit der Energiebereitstellung für die verschiedenen Antriebs- und Kraftstoffkombinationen aus dem Blick. Verwirrung stiftet zum Beispiel die Tatsache, dass gelegentlich batterieelektrische Fahrzeuge auf Basis des deutschen Strommix verglichen werden mit Brennstoffzellen- oder PtG- bzw. PtL-betriebenen Fahrzeugen, bei denen der Energieträ-

ger ausschließlich aus EE-Strom erzeugt wird. Dies ist kein angemessener Vergleich. Für einen klimabilanzzielen Vergleich strombasierter Antriebskonzepte sollten bei allen Energieträgern die gleichen Grundannahmen für den Emissionsfaktor des eingesetzten Stroms gelten.

Aus den genannten Gründen wird in der vorliegenden Studie für alle strombasierten Alternativen der deutsche Strommix zugrunde gelegt, und zwar mit den gleichen Annahmen hinsichtlich wachsender Anteile von Strom aus erneuerbaren Energien am deutschen Strommix wie in der Studie „Klimabilanz von Elektroautos“ (2030: 65 Prozent). Alternative Herstellungspfade, die auch langfristige nicht das Potential haben, zur Vollständigen Dekarbonisierung des Verkehrs beizutragen, werden hier nicht weiter betrachtet.

Analog zu der ersten Studie wurde hier ein zentrales Szenario betrachtet. Dies beschreibt die gemischte Nutzung eines Fahrzeugs in der Stadt, auf Landstraßen und der Autobahn. Zusätzlich wurde als Sensitivität eine Variante analysiert, deren Fokus auf der Langstreckenmobilität liegt, es werden also ausschließlich Fahrten auf der Autobahn verglichen. Für die fahrzeugseitige Modellierung wurde ein Kompaktklassenfahrzeug mit unterschiedlichen Antriebs- und Kraftstoffkombinationen untersucht. Um die Vergleichbarkeit mit der ersten Studie zu gewähren, wird hier ein Kompaktklassenfahrzeug betrachtet. Die bereits verfügbaren FCEV-Modelle sind größer als das Vergleichsfahrzeug. Aus diesem Grund wurde für das Brennstoffzellenfahrzeug der Wasserstoffverbrauch aufgrund des niedrigeren Gewichts des modellierten Fahrzeugs entsprechend herunterskaliert.

7 Vgl. Kasten et al. (2019).

1.2. In der Klimabilanz eines Brennstoffzellenfahrzeugs, das mit elektrolytisch hergestelltem Wasserstoff aus deutschem Strommix betrieben wird, liegen die Treibhausgasemissionen 75 Prozent über denen eines Batteriefahrzeugs mit 35 kWh Batteriekapazität. Beim Vergleich mit einem Batteriefahrzeug mit 60 kWh im reinen Autobahnbetrieb liegen die Emissionen um 56 Prozent darüber.

Die Rechnungen zeigen, dass die elektrolytische Herstellung von Wasserstoff mit dem deutschen Strommix die Klimawirkung des betrachteten Fahrzeugs deutlich verschlechtert. Bezogen auf den gesamten Lebenszyklus sind die Treibhausgasemissionen des betrachteten FCEV nach 150.000 km Fahrleistung mit gemischter Fahrweise 75 Prozent höher als die des BEVs mit 35 kWh Batteriekapazität. Gegenüber dem Dieselfahrzeug in gemischter Nutzung ist die Klimawirkung bei 150.000 km Lebensfahrleistung immer noch 47 Prozent höher. Die fortschreitende Dekarbonisierung des deutschen Strommix ist sowohl für das BEV als auch für das FCEV in die Rechnungen eingeflossen.

Da das Einsatzspektrum von FCEV in erster Linie die Langstrecke sein dürfte, wird der Vergleich um ein BEV mit größerer Batteriekapazität von 60 kWh und reinen Autobahnfahrten erweitert. Das Ergebnis ändert sich jedoch nur unwesentlich. Bei 200.000 km Lebensfahrleistung auf Autobahnen liegt die Klimawirkung des betrachteten Brennstoffzellenfahrzeugs immer noch 56 Prozent über der des batterieelektrischen Fahrzeugs mit 60 kWh. Im Vergleich mit dem Dieselfahrzeug wären die Treibhausgasemissionen bei den gleichen Randbedingungen um 45 Prozent höher.

In welchem Maße sich der nur bei der Fahrzeugherstellung entstehende ökologische Rucksack zwischen FCEV und BEV unterscheidet, hängt stark von der Batteriegroße des BEVs ab. Auch ein Brennstoffzellenfahrzeug startet sein Fahrzeugleben mit einem zusätzlichen ökologischen

Rucksack. Bei der Produktion entstehen also mehr Treibhausgasemissionen als bei der Herstellung eines Diesels oder Benziners. Das betrachtete Fallbeispiel führt zu einer ähnlich hohen Klimawirkung des Brennstoffzellenfahrzeugs in der Herstellung wie die des analysierten BEVs mit 35 kWh. Das heißt, dass sowohl für das BEV als auch für das FCEV zirka fünf Tonnen Treibhausgasemissionen zusätzlich bei der Fahrzeugherstellung entstehen. Bei einer Batteriekapazität von 60 kWh liegt der ökologische Rucksack des betrachteten BEVs oberhalb des Rucksacks des FCEV, bei noch größeren Batteriekapazitäten von 90–100 kWh wäre dieser Unterschied noch deutlicher. Allerdings sind bei allen betrachteten Vergleichen die Emissionen, die während der Fahrzeugnutzung entstehen, ausschlaggebend für die Gesamtbilanz. Auch bei größeren Batteriekapazitäten als den hier betrachteten 60 kWh bleibt die Klimabilanz des BEVs tendenziell günstiger, wenn im Vergleich der beiden Antriebsarten jeweils derselbe Strommix für das Laden des BEVs und für die Wasserstoff-Elektrolyse zugrunde gelegt wird.

Brennstoffzellenfahrzeuge verfügen ebenso wie batterieelektrische Fahrzeuge über einen Elektromotor. Im Vergleich zu anderen konventionellen Antrieben sind sie deswegen effizienter. Allerdings ist die Verfügbarkeit von ausreichenden Mengen von zusätzlichem EE-Strom für die Herstellung von grünem Wasserstoff eine Voraussetzung dafür, dass Brennstoffzellenfahrzeuge auch aus klimabilanzieller Sicht ihr volles Reduktionspotential entfalten können.

1.3 In der Klimabilanz eines Fahrzeugs mit Verbrennungsmotor, das mit strombasierten Flüssigkraftstoffen aus deutschem Strommix betrieben wird, sind die Treibhausgasemissionen rund drei Mal so hoch wie die des Batteriefahrzeugs mit 35 kWh.

Werden synthetische Kraftstoffe, die mit deutschem Strommix hergestellt werden, für den Antrieb von herkömmlichen Diesel-Pkw genutzt, so ist die Klimabilanz besonders schlecht. Durch die – auch gegenüber der Wasserstoffherstellung – deutlich höheren Konversi-

onsverluste liegt die Klimawirkung in allen betrachteten Fällen um ein Vielfaches über der direkten Stromnutzung im BEV. Dies gilt selbst dann, wenn die forstschreitende Energiewende mit einkalkuliert wird und unterstellt wird, dass 65 Prozent des Stroms in Deutschland im Jahr 2030 aus erneuerbaren Energien stammen.

Bezogen auf den gesamten Lebenszyklus sind die Treibhausgasemissionen des Diesel-Pkw mit PtL nach 150.000 km Fahrleistung mit gemischter Fahrweise drei Mal so hoch wie die des BEVs mit 35 kWh Batteriekapazität. Gegenüber dem Dieselfahrzeug in gemischter Nutzung ist die Klimawirkung bei 150.000 km Lebensfahrleistung zweieinhalb Mal so hoch. Dies ist in erster Linie auf die schlechteren Wirkungsgrade bei der Erzeugung von PtG und PtL zurückzuführen, sowie auf die schlechteren Wirkungsgrade des Verbrennungsmotors gegenüber dem Elektromotor.

Dies unterstreicht die Bedeutung des eingesetzten Stroms. Die Produktion synthetischer Kraftstoffe kann aus Klimasicht nur dann sinnvoll sein, wenn diese durch Erschließung zusätzlicher Potenziale von Wind- und Solarenergie vollständig klimaneutral hergestellt werden. Dies erfordert allerdings aufgrund der schlechteren Wirkungsgrade einen enormen Bedarf an zusätzlichen EE-Kapazitäten.

1.4 Sollen Wasserstoff oder strombasierte Kraftstoffe im Verkehr einen Klimaschutzbeitrag leisten, so muss sichergestellt werden, dass bei ihrer Produktion ausschließlich Wind- oder Solarstrom aus zusätzlichen Kapazitäten verwendet wird.

Im Kontext von batterieelektrischer Elektromobilität ist eine Schlussfolgerung: das BEV ist so grün wie der Strom, mit dem es fährt. Dies gilt auch für Brennstoffzellenfahrzeuge und Fahrzeuge, die mit strombasierten Kraftstoffen fahren. Eine Schlussfolgerung aus den Ergebnissen drängt sich daher regelrecht auf: Nicht nur das BEV braucht die Energiewende – auch für PtH₂, PtG und PtL ist sie eine unabdingbare Voraussetzung.

Damit grüner Wasserstoff und PtX-Kraftstoffe allerdings einen Netto-Klimanutzen haben, muss der eingesetzte Strom nicht nur aus Wind- oder Solaranlagen kommen, sondern diese Mengen müssen zusätzlich zu den bereits heute geplanten EE-Anlagen bereitgestellt werden können.⁸ Andernfalls handelt es sich um eine reine Verschiebung erneuerbar erzeugter Energie von einem Sektor in den anderen. Die Ziele für Wind- und Solarstrom sind als prozentuale Ziele definiert, das heißt, dass eine Erhöhung der Stromnachfrage automatisch eine Anhebung der Menge an Wind- und Fotovoltaikanlagen nach sich ziehen müsste. Doch die Ausbaupfade und begleitenden Regelungen für die Errichtung von Windkraft- und Fotovoltaikanlagen sind immer wieder Gegenstand intensiver politischer Debatte.

Ohnehin wird ein Großteil der PtX-Produktion aller Voraussicht nach an den Gunststandorten von Wind und Sonne jenseits der deutschen Grenzen stattfinden.⁹ Wenn grüner Wasserstoff oder PtG bzw. PtL importiert werden, muss ebenfalls nachweisbar sein, dass diese Energieträger aus zusätzlichen Erneuerbare-Energien-Anlagen stammen. Analog zu Biokraftstoffen müssen deshalb Nachhaltigkeitsregeln für grünen Wasserstoff, PtG und PtL vereinbart werden, die in den Erzeugerländern gelten. Außerdem ist eine Bilanzierung und Überwachung der CO₂-Reduktion sicherzustellen. Die Grundlagen dafür sind zeitnah zu schaffen.

Viele Studien kommen übereinstimmend zu dem Schluss, dass grüner Wasserstoff und strombasierte Kraftstoffe für eine weitergehende Dekarbonisierung aller Sektoren gebraucht werden.¹⁰ Ähnlich wie bei Strom aus Wind und Sonne, werden ihre Mengen in absehbarer Zeit jedoch begrenzt sein. Es ist zu erwarten, dass zwischen den verschiedenen Sektoren Nutzungskonkurrenzen um diese Energieträger auftreten werden. Vorrangig gilt es daher, den Energieverbrauch insgesamt zu reduzieren und die gesamte Effizienz des Verkehrssystems zu stei-

8 Eine ähnliche Diskussion gibt es zur Frage des zusätzlichen Strombedarfs von batterieelektrischen Fahrzeugen. Zu einer vertieften Diskussion von Strombezug und Zusätzlichkeit, siehe Kasten et al. (2019) und Kasten et al. (2017).

9 Ergänzend wird die PtH₂-Produktion mit Offshore-Wind in Europa diskutiert.

10 Agora Verkehrswende und Agora Energiewende (2018); Gerbert et al. (2018).

gern. Deswegen gebührt der batterieelektrischen Mobilität hier der Vorrang – sowohl aus Effizienz- als auch aus Verfügbarkeitsgründen. Für den Verkehrsbereich werden strombasierte Alternativen für jene Verkehrsträger benötigt, für die keine anderen Alternativen verfügbar sind. Nach gegenwärtigem Kenntnisstand sind dies insbesondere Langstreckenflugzeuge und Hochseeschiffe.

1.5 Die Klimabilanz eines mit Erdgas betriebenen Pkw der Kompaktklasse ist über den gesamten Lebenszyklus nur unwesentlich besser als die eines Diesel-Pkw. Die Emissionen des Erdgasfahrzeugs sind zirka 14 Prozent höher als die des Batteriefahrzeugs mit 35 kWh Batteriekapazität.

Das bilanzierte Erdgasfahrzeug zeigt nach 150.000 km Fahrleistung ein etwa 4 Prozent besseres Ergebnis als der Diesel. Wie in allen Vergleichen im Rahmen dieser Studie bezieht sich dieser Wert auf die Betrachtung des gesamten Lebenszyklus des Fahrzeugs. Es werden also nicht nur die Emissionen betrachtet, die bei der Verbrennung von Erdgas respektive Diesel entstehen (*tank-to-wheel*) sondern auch die Fahrzeugherstellung und die Vor-kette des komprimierten Erdgases (*compressed natural gas* – CNG). Dadurch nivellieren sich die Ergebnisse und Erdgas hat nur einen sehr geringen Vorteil gegenüber dem Dieselfahrzeug. Im Vergleich mit dem batterieelektrischen Fahrzeug sind die Treibhausgasemissionen des Erdgasfahrzeugs nach 150.000 km Fahrleistung etwa 14 Prozent höher als die des BEVs mit 35 kWh Batteriekapazität.

Die Klimabilanz des Erdgas-Pkw lässt sich durch die Beimischung von Biomethan verbessern. Hier wurden allerdings aus Gründen der Vergleichbarkeit keine erhöhten Anteile von Biomethan im CNG betrachtet. Um eine optimale Vergleichbarkeit von Erdgas-Pkw und BEV zu gewähren, wurden beide mit dem Durchschnittsstrom- bzw. dem Durchschnittsgasmix bilanziert. Letzterem sind nur knapp ein Prozent Biomethan beige-mischt und die Potenziale, diesen Anteil zu erhöhen, sind begrenzt. Legt man Durchschnittswerte zugrunde, so ist

sichergestellt, dass weder EE-Strom noch Biomethan doppelt angerechnet werden (beispielsweise sowohl im Verkehrs- als auch im Energiesektor).

Trotz der Gefahr der oben beschriebenen Mehrfachanrechnung ist eine solche Bilanzierung mit höheren Biogasanteilen prinzipiell möglich. Wird in Klimabilanzen ein höherer Biomethananteil veranschlagt, sind beim ebenfalls betrachteten BEV gleichermaßen hohe Ökostromzertifikate anzurechnen.

02 | Hintergrund, Ziel und Rahmen der Kurzstudie

Um die national und international beschlossenen Klimaschutzziele zu erreichen, braucht es neben einer umfassenden Mobilitätswende auch eine Dekarbonisierung der Energieträger im Verkehr. Neben der kontrovers diskutierten Möglichkeit des Einsatzes von Biokraftstoffen steht hier die Nutzung von erneuerbarem Strom im Vordergrund. Mit der Energiewende sind in Deutschland bereits die Weichen für einen weitergehenden Ausbau erneuerbarer Energien gestellt. Batterieelektrische Pkw (BEV) machen diese erneuerbaren Energien auch im motorisierten Individualverkehr effizient nutzbar und gelten daher als ein wichtiger Baustein für die Dekarbonisierung des Verkehrs. Ihr Beitrag zum Klimaschutz steht jedoch aufgrund der heute immer noch hohen Anteile fossiler Stromerzeugung in Deutschland sowie der aufwendigen Batterieproduktion immer wieder in der Kritik. Die vom ifeu für die Agora Verkehrswende erstellte Studie „Klimabilanz von Elektroautos – Einflussfaktoren und Verbesserungspotenzial“ hat daher die zentralen Einflussfaktoren auf die Klimabilanz von BEV dargestellt und aufgezeigt, welche Verbesserungspotenziale es bei den einzelnen Schritten (insbesondere der Batterieherstellung) gibt.

Der darin bilanzierte Beispielfall zeigt selbst unter konservativen Annahmen für die Batterieherstellung nach 150.000 km durchgehend eine bessere Klimabilanz für das BEV gegenüber dem Verbrenner (ICEV). Auch wenn in den nächsten Jahren keine weitere Verbesserung der Stromerzeugung realisiert werden sollte, ist kaum mit einer schlechteren Klimabilanz des BEV gegenüber dem ICEV zu rechnen. Dies gilt in vielen Fällen auch für Stadtfahrzeuge mit niedrigerer Lebensfahrleistung, da hier BEV sehr energieeffizient sind und zudem geringere Reichweiten benötigen, also auch nur kleine Batterien. Umgekehrt werden im Autobahnbetrieb tendenziell hohe Reichweiten benötigt und auch der Verbrauch von BEV ist vergleichsweise hoch. Entsprechend müssen im Autobahnbetrieb hohe verbrennungsmotorische Fahrleistungen im Bereich von 200.000 km substituiert werden, um eine positive Klimabilanz für das Elektroauto zu erreichen (siehe Agora Verkehrswende 2019b).

Neben dem batterieelektrischen Antriebskonzept werden daher auch weitere Möglichkeiten einer strombasierten Dekarbonisierung der im Verkehr eingesetzten Energieträger diskutiert, insbesondere Wasserstoff und synthetische Kraftstoffe, mit denen herkömmliche Verbrenner betrieben werden können. Die bisherige Fokussierung

der Analyse auf BEV ergab sich vor allem aus deren Marktreife und -relevanz: BEV haben mittlerweile CNG-Pkw nicht nur bei den Neuzulassungen, sondern auch im Bestand hinter sich gelassen (KBA 2019) – während FCEV noch ein Nischendasein am Markt¹¹ führen und strombasierte synthetische Kraftstoffe nicht einmal an der Tankstelle verfügbar sind. Trotzdem wird regelmäßig die Frage gestellt, wie diese Optionen in punkto Klimabilanz gegenüber einem weitgehend fossil betriebenen ICEV sowie einem BEV abschneiden würden.

Das Ziel der Kurzstudie ist es daher, die Diskussion um die Klimabilanz von BEV im Rahmen des Fallbeispiels weiterzuführen und auszudehnen auf den Vergleich mit anderen alternativen Antrieben und Kraftstoffen. Ergänzt wird diese Betrachtung nun um einen vergleichbaren Erdgas- und einen Brennstoffzellen-Pkw.¹² Den heute noch den Markt prägenden fossil betriebenen verbrennungsmotorischen Referenzen (Benzin, Diesel) werden andere strombasierte Alternativen gegenübergestellt: Neben dem BEV wird ein mit Wasserstoff aus Elektrolyse betriebenes FCEV betrachtet und ein mit strombasierten synthetischen Kraftstoffen (sogenannte Power-to-Liquids (PtL) bzw. Power-to-Gas (PtG)) betriebener ICEV/CNG-Pkw. Dabei erhebt die Studie weiterhin nicht den Anspruch, die beste oder einzig richtige Klimabilanz zu sein. Sie diskutiert vielmehr einen über das Fallbeispiel definierten Ausschnitt.

11 Von den bisher 135.193 zur Kaufprämie gestellten Anträgen entfielen 89.864 auf batterieelektrische Fahrzeuge, 45.236 auf Plug-In-Hybride und nur 93 auf Brennstoffzellenfahrzeuge (BAFA 2019).

12 Heutige FCEV sind überwiegend größeren Segmenten zuzuordnen. Das Beispiel eines FCEV der Kompaktklasse ist daher aktuell ein hypothetisches. Die Unterschiede für den Klimarucksack der Fahrzeugherstellung ergeben sich aus Komponenten, die in dem einen Fahrzeugkonzept enthalten sind, in dem anderen aber nicht (wie z. B. Li-Ionen-Akku oder Wasserstofftank). Die Betrachtung eines Fahrzeugs aus einem größeren Segment würde damit jenseits der Auslegung von Tank, Brennstoffzelle und Batterie – die jeweils individuell angepasst werden müssten – alle Antriebskonzepte gleichermaßen betreffen, da der Bedarf an Stahl oder anderen Materialien für die Karosserie bei allen Vergleichsfahrzeugen gleichermaßen ansteigen würde. Um verschiedene Einsatzspektren zu berücksichtigen, wird im Folgenden jedoch eine zusätzliche Sensitivität betrachtet.

Was diese Kurzstudie leisten kann und was nicht

Die Kurzstudie leistet einen Beitrag zur Diskussion um den Einsatz vor allem strombasierter Alternativen in Pkw anhand eines Fallbeispiels. Damit ersetzt sie aber keine umfassende Studie zu allen Aspekten der betrachteten Antriebskonzepte. Im Vordergrund steht die Vergleichbarkeit der energie-wirtschaftlichen Rahmenbedingungen. Dies unterstützt die technische Einordnung der Antriebskonzepte und Energieträger und die Identifizierung ihrer jeweiligen Stärken und Schwächen. **In dem begrenzten Rahmen einer Kurzstudie können jedoch verschiedene Aspekte nicht geleistet werden:**

- **100-prozentige Vergleichbarkeit der Fahrzeugkonzepte:** Die betrachteten Antriebe haben unterschiedliche Eigenschaften und sind damit niemals vollständig miteinander vergleichbar. Reichweiten bzw. Tank- und Ladezeiten sowie das Beschleunigungsverhalten sind konzeptbedingt unterschiedlich. Ferner unterscheiden sich der Reifegrad und die Marktverfügbarkeit der Technologien und ihrer Infrastruktur sowie die Kostensituation. Da die betrachteten Technologien teilweise komplementäre Einsatzspektren abdecken können, ist der hier gezeigte direkte Vergleich nur ein Aspekt der Bewertung.
- **Repräsentativität:** Die Diskussion erfolgt anhand eines Beispielfahrzeugs, um die technischen Unterschiede der Konzepte aufzuzeigen. Dieses Fahrzeug ist dabei nicht allein repräsentativ für die jeweiligen Antriebskonzepte, die aufgrund der teilweise komplementären Einsatzspektren am Markt auch technisch unterschiedlich ausgelegt werden.
- **Potenzialanalyse:** Betrachtet werden Fahrzeuge in ihrem heutigen Entwicklungsstand und mit einer Nutzung im Zeithorizont bis 2030. Insbesondere bei neueren Antriebskonzepten (BEV und FCEV) können sich die Fahrzeuge, die Produktionsbedingungen sowie die Energieerzeugung weiterentwickeln. Die Entwicklung kann zwischen den betrachteten Konzepten auch unterschiedlich ausfallen. Mit Fokus auf die Batterieherstellung wurden derartige Verbesserungen bereits untersucht (Agora Verkehrswende 2019 b). Eine ähnliche Potenzialanalyse konnte hier für die hinzugefügten Antriebskonzepte nicht durchgeführt werden, ist aber ein wichtiger Untersuchungsgegenstand für andere Studien.
- **Energiewirtschaftliche Bewertung:** Für alle alternativen Pfade wird jeweils der gleiche mittlere Strommix in Deutschland angenommen. Darüber hinaus werden keine weiteren Einzelbetrachtungen für den gezielten Einsatz erneuerbarer Energien in bestimmten Bereichen oder den Import von Strom aus erneuerbaren Energien quantifiziert. Eine solche Diskussion um Import-, Überschuss- und Grünstrom ist im Rahmen dieser Kurzstudie nicht zu leisten, wurde aber bereits an anderer Stelle geführt. Auch Biokraftstoffe wurden hier nicht betrachtet.
- **Weitere Fahrzeugtypen:** Der ausschließliche Fokus der Kurzstudie liegt auf Pkw. Die Ergebnisse haben daher keine Aussagekraft über den Einsatz der Energieträger in anderen Fahrzeugtypen, z.B. im Schwerlast- oder Flugverkehr. Hier kann die Bewertung von Wasserstoff und synthetischen Kraftstoffen anders ausfallen.

Ein wichtiger Vorteil der Nutzung von Wasserstoff sowie von synthetischen Kraftstoffen ist die hohe Energiedichte, die sie besonders geeignet für den Fernverkehr macht. Die betrachteten Technologien decken also teilweise komplementäre Einsatzspektren ab, sodass der hier gezeigte direkte Vergleich nur ein Aspekt der Bewertung sein sollte. Um diesem Umstand Rechnung zu tragen, wird neben der gemischten Nutzung für FCEV und synthetischen Kraftstoff auch der Beispielfall eines Fahrzeugs im reinen Autobahnbetrieb betrachtet, der dann beim BEV eine größere Batteriekapazität notwendig macht.

Ziel der Untersuchung ist jeweils eine größtmögliche Vergleichbarkeit der energiewirtschaftlichen Rahmenbedingungen. Daher wird für alle alternativen Pfade jeweils der gleiche mittlere Strommix in Deutschland entsprechend der Studie „Klimabilanz von Elektroautos“ verwendet, der auch den geplanten Ausbau erneuerbarer Energien bis 2030 berücksichtigt. Es werden über den deutschen Strommix hinaus keine weiteren Einzelbetrachtungen für den gezielten Einsatz erneuerbarer Energien in bestimmten Bereichen oder den Import von erneuerbarem Strom quantifiziert. Eine solche Nutzung ausschließlich erneuerbarer Energien für ein Fahrzeugkonzept macht jeweils eine Detailbetrachtung der tatsächlichen Zusätzlichkeit notwendig, da mit einer reinen Allokation bestehender erneuerbarer Energien für bestimmte Zwecke im Gesamtsystem keine Minderung an Treibhausgasemissionen erreicht wird. Eine solche erweiterte Diskussion um Import-, Überschuss- und Grünstrom ist im Rahmen dieser Kurzstudie jedoch nicht zu leisten, wurde aber bereits an anderer Stelle geführt (siehe z. B. Sternberg et al. 2019).

Die Berücksichtigung von durchschnittlichen Ländermischen ist dabei gängige Praxis in Ökobilanzen, um eine hohe Vergleichbarkeit der Ergebnisse auf Systemebene herzustellen, Doppelzählungen zu vermeiden und das technische Potenzial der Antriebe aufzuzeigen. Darüber hinaus kann die Betrachtung davon abweichender Rahmenbedingungen für die Bewertung spezieller Fragestellungen, Maßnahmen oder Situationen trotzdem sehr wertvoll sein. Hier geht es dann eher um die Frage, unter welchen Bedingungen eine robuste Zusätzlichkeit erneuerbarer Energien hergestellt werden kann. Daher werden andere mögliche Pfade der Wasserstoff- bzw. PtL- und PtG-Herstellung oder die Beimischung von importiertem

PtL/PtG qualitativ diskutiert. Ebenfalls qualitativ diskutiert wird die Verfügbarkeit geeigneter Biokraftstoffe als Dekarbonisierungsoption.

Zunächst erfolgt in dieser Kurzstudie daher eine Einordnung der betrachteten Energieträger und ihrer Verfügbarkeiten. Danach werden die zentralen Aspekte und Datengrundlagen einer quantitativen Klimabilanz jeweils einzeln diskutiert und einander gegenübergestellt. Der Fokus liegt hier auf den gegenüber der Studie „Klimabilanz von Elektroautos“ neu hinzugenommen Fahrzeugkonzepten und Energieträgern. Dabei soll eine möglichst große Vergleichbarkeit mit den bisherigen Annahmen für ICEV und BEV hergestellt werden. Abschließend werden dann die Klimabilanzen über den gesamten Lebensweg dargestellt und verglichen.

03 | Einordnung alternativer Energieträger

Der Begriff *alternative Kraftstoffe* umfasst nach der Definition der Richtlinie über den Aufbau der Infrastruktur für alternative Kraftstoffe (*Alternative Fuels Infrastructure Directive – AFID*)¹³ alle „Kraftstoffe oder Energiequellen, die zumindest teilweise als Ersatz für Erdöl als Energieträger für den Verkehrssektor dienen und die zur Reduzierung der CO₂-Emissionen beitragen und die Umweltverträglichkeit des Verkehrssektors erhöhen können“. Laut der Richtlinie gelten somit auch Erdgas (*Compressed Natural Gas – CNG*, *Liquid Natural Gas – LNG*), Flüssiggas (*Liquefied Petroleum Gas – LPG*), Biokraftstoffe inklusive Biomethan sowie synthetische Kraftstoffe, Wasserstoff und Elektrizität als alternative Kraftstoffe. Unter diesen Typologien fächert sich wiederum eine große Vielfalt an Untervarianten auf: Biokraftstoffe können aus sehr unterschiedlichen Biomasserohstoffen mit sehr verschiedener Technologie produziert werden, was ihnen wiederum sehr unterschiedliche Eigenschaften hinsichtlich ihrer Treibhausgasintensität verleiht. Dies zeigen die Standardwerte der Richtlinie zur Förderung der Nutzung von Energie aus erneuerbaren Quellen (*Renewable Energy Directive – RED*),¹⁴ aber auch viele andere Studien (z. B. Fehrenbach et al. 2016). Gleiches gilt auch für synthetische Kraftstoffe.¹⁵

In dieser Studie wird der Rahmen auf jene Optionen eingegrenzt, deren Potenzial zumindest theoretisch ausreichen würde, den Energiebedarf im Verkehr zu decken. Dies sind die strombasierten Antriebsoptionen, da für die Produktion erneuerbaren Stroms national wie global große Potenziale bestehen (Pfennig et al. 2017).

3.1 Flüssige Biokraftstoffe

Biokraftstoffe sind laut der oben genannten Richtlinie zwar alternative Kraftstoffe, allerdings fehlt ihnen das Potenzial, den Energiebedarf des Verkehrs zu decken.

Das gilt sowohl für flüssige Biokraftstoffe wie auch für Biomethan als CNG. Dieselmotoren hatten im Jahr 2018 einen Anteil von 6,3 Prozent Biodiesel und Benzin enthält 4,4 Prozent Bioethanol.¹⁶ Diese Anteile haben sich gegenüber 2017 leicht gesteigert und werden voraussichtlich auch künftig eine gewisse Rolle spielen. Dies gilt insbesondere für die aus biogenen Abfall- und Reststoffen erzeugten fortschrittlichen Biokraftstoffe, die gemäß der Erneuerbare-Energien-Richtlinie und deren Neufassung (*Renewable Energy Directive II – RED II*) u. a. über eine Mindestquote gefördert werden. Unter fortschrittlichen Biokraftstoffen sind nach dieser Richtlinie solche Kraftstoffe zu verstehen, die nicht in Konkurrenz mit der Nahrungsmittelproduktion stehen. Dazu gehören sowohl aus Algen gewonnene Biokraftstoffe als auch Biokraftstoffe, die aus Abfällen und Reststoffen hergestellt werden.

Eine Reihe aktueller Studien zeigt die Potenziale fortschrittlicher Biokraftstoffe auf, z. B. Thrän et al. (2019), Fehrenbach et al. (2019) für Deutschland oder Camia et al. (2018) für Europa. Es liegen auch globale Studien vor (IRENA 2016, IEA 2018). Die in den Studien abgeleiteten Potenziale sind keineswegs zu vernachlässigen. Die Ergebnisse schwanken jedoch erheblich, je nachdem welche Kriterien man für ein verfügbares, ein zusätzlich erschließbares und vor allem ein nachhaltiges Potenzial ansetzt. Dabei spielen auch Nutzungskonkurrenzen eine große Rolle. So weist die Studie von Fehrenbach et al. (2019) – ganz ähnlich wie Thrän et al. (2019) – ein primärenergetisches Gesamtpotenzial an biogenen Reststoffen von um die 900 PJ pro Jahr aus,¹⁷ doch wird anhand eines mit ökologischen, ökonomischen und technischen Kriterien erstellten Gesamtnutzungskonzeptes eine überwiegende Nutzung dieser Stoffe für Prozesswärme priorisiert. Nur kleinere Anteile werden der Kraftstoffherstellung zugewiesen, im Höchstfall resultieren daraus 190 PJ fortschrittlicher Biokraftstoff, der im Übrigen nach den Autoren der Studie prioritär im Flug- und Schiffsverkehr genutzt werden sollte, da dort der Einsatz von Strom eher unwahrscheinlich ist.

13 Richtlinie 2014/94/EU (2014).

14 Richtlinie 2009/28/EG (2009); ab 2021 geltend mit der Neufassung der Richtlinie (EU) 2018/2001 (2018).

15 Nach der Definition des Begriffs synthetische Kraftstoffe in der AFID-Richtlinie sind damit durch Umwandlung erzeugte Kraftstoffe gemeint, wobei jegliche Art Rohstoff eingesetzt werden kann (sowohl fossile als auch Biomasse); aus heutiger Sicht zählen dazu auch strombasierte Kraftstoffe (PtX), die in der RED II als erneuerbare Kraftstoffe nicht-biogenen Ursprungs bezeichnet werden.

16 Berechnet durch das ifeu anhand der von der BLE (2019) angegebenen Biokraftstoffmengen und der Diesel- und Benzinverbräuche nach den Energiedaten des BMWi (2019).

17 Darin enthalten sind u. a. etwa 11 Mio. Tonnen Waldholz und 13 Mio. Tonnen Stroh.

Demgegenüber steht ein Endenergiebedarf des gesamten Verkehrs von ca. 2.700 PJ im Jahr 2018.¹⁸

Thrän et al. (2019) gehen bei einer vollständigen Verwendung der Abfall- und Reststoffe für den Kraftstoffbereich von 288 PJ pro Jahr aus. Dies entspricht etwa 11 Prozent des gesamten Endenergiebedarfs des Verkehrs bzw. 13 Prozent des straßen- und schienengebundenen Verkehrs.

Beide Studien gehen von einem erschließbaren Rohstoffpotenzial unter Einbeziehung von Kriterien der Nachhaltigkeit aus. Sie bilden somit das Maximum dessen ab, was an abfall- und reststoffbasierten Biokraftstoffen verfügbar gemacht werden kann.

Die Quintessenz aus den Studien ist somit: Der potenzielle Beitrag der fortschrittlichen Biokraftstoffe bleibt selbst unter optimistischen Annahmen unter 11 Pro-

zent am Gesamtkraftstoffverbrauch.¹⁹ Darin enthalten sind auch die Potenziale für Biomethan aus Abfall- und Reststoffen.

Neben den fortschrittlichen sind auch die konventionellen Biokraftstoffe zu nennen, die auf Anbaubiomasse²⁰ beruhen. Für diese sieht jedoch die aktuelle Rechtslage wie auch die RED II eine Deckelung bezüglich der Anrechenbarkeit auf die Quotenziele vor. Es ist deshalb nicht davon auszugehen, dass der Anteil von auf Anbaubiomasse basierenden Biokraftstoffen an der Kraftstoffversorgung signifikant steigen wird.

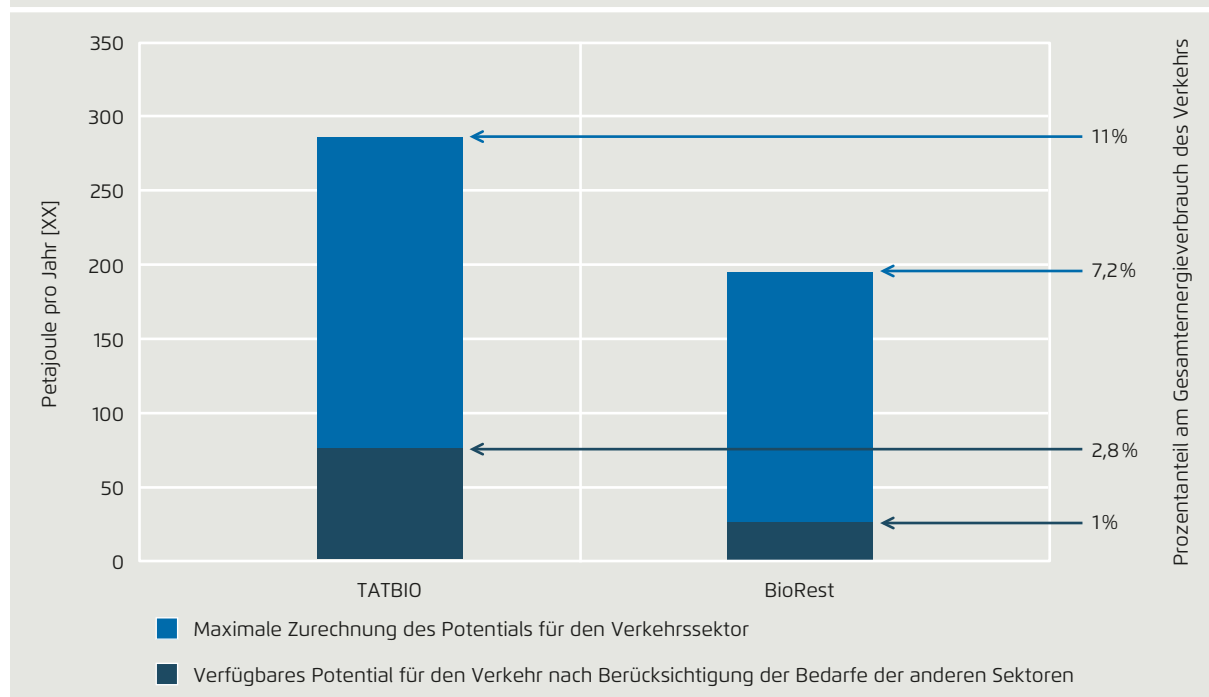
19 Nach den Daten des BMWi (2019) betrug im Jahr 2018 der Gesamtkraftstoffverbrauch des Verkehrs 2.660 PJ, der zusätzliche Stromverbrauch (Bahn, E-Mobilität) lag bei 44 PJ. Der Endenergiebedarf des Verkehrs lag somit bei ca. 2.700 PJ.

20 Die RED II definiert dies als Nahrungs- und Futtermittelpflanzen.

18 BMWi (2019).

Potenziale von fortschrittlichen Biokraftstoffen unter Berücksichtigung von Nutzungskonkurrenzen

Abbildung 1



Eigene Darstellung durch ifeu nach TATBIO: Thrän et al. (2019), BioRest: Fehrenbach et al. (2019).

Biokraftstoffe und Biomethan werden folglich zwar auch künftig eine Rolle im Kraftstoffbereich spielen, sie werden jedoch nicht annähernd den Gesamtbedarf decken können. In Anlehnung an Klimaschutzszenarien im Verkehr (Agora Verkehrswende 2018) wird angenommen, dass der Biokraftstoffanteil in etwa auf dem heutigen Niveau bleibt. Analog zur Studie „Klimabilanz von Elektroautos“ (Agora Verkehrswende 2019b) werden diese Anteile im Folgenden in die Rechnungen für Diesel und Benzin miteinbezogen.

3.2 Erdgas und Bio-CNG

Es ist eine besondere Herausforderung, bei der Erstellung vergleichender Klimabilanzen die Anrechnung von biogenen Anteilen im Erdgas und letztlich im Erdgasfahrzeug zu berücksichtigen. Bei Benzin oder Diesel entspricht der Anteil, der beigemischt ist, der physischen Realität. Diese Mengenverhältnisse stellen sich bei Erdgas bzw. komprimiertem Erdgas (CNG) und Biomethan anders dar – je nach gewähltem Bezugsrahmen.²¹ Von der in Deutschland im Jahr 2018 über das Gasnetz verteilten und verbrauchten Erdgasmenge von 3.121 PJ²² werden als CNG-Kraftstoff im Verkehr 7,56 PJ eingesetzt.²³ CNG-Kraftstoff macht also nur einen sehr kleinen Teil des in Deutschland verbrauchten Erdgases aus, nämlich 0,2 Prozent der gesamten Erdgasmenge. Das im Fahrzeug verwendete CNG ist physisch ein Mix aus einem sehr hohen Anteil fossilen (Erdgas) und einem sehr geringen Anteil nicht-fossilen Ursprungs (Biomethan). Die Produktion von Biomethan in Deutschland liegt nach DBFZ²⁴ bei 29,16 PJ im Jahr, das sind verglichen mit Erdgas 0,93 Prozent. Über das Biogasregister²⁵ können Erdgasabnehmer allerdings per Zertifikat Anteile am eingespeisten Biomethan erwerben. Das Biomethan wird verschiedenen Sektoren zugerechnet. Etwa 5 Prozent der Biomethanzertifikate gehen in Deutschland in den Verkehr; der größte Anteil der Biomethanzertifikate geht in den Strom- und Wärmebereich. Die 5 Prozent Biomethan

in Form von CNG-Kraftstoff entsprechen 1,4 PJ.²⁶ Dies wiederum ist 0,04 Prozent der Erdgasmenge. Setzt man die 1,4 PJ Biomethan jedoch mit der wesentlich kleineren Gesamtmenge des CNG-Kraftstoffs ins Verhältnis, so hat Biomethan darin einen deutlich höheren rechnerischen Anteil von 19 Prozent.

Wie ist mit diesem Umstand im Rahmen einer Öko- bzw. Klimabilanz umzugehen? Darf ein über Zertifikate angerechneter Anteil an Biomethan als Basis für ein Lebensweginventar bzw. einen CO₂-Fußabdruck verwendet werden? Und wie ist klimabilanziell ein sauberer Vergleich zwischen unterschiedlichen Systemen wie z. B. Erdgas-Pkw und BEV anzustellen?

Tatsächlich bietet das existierende und im Grunde unumgängliche Verteilsystem des Erdgasnetzes dem Verbraucher keine Möglichkeit, gezielt das Produkt Biomethan physisch zu beziehen (mit Ausnahme des Weges über reine Biomethan-Tankstellen). Weil Biomethan in der Regel ins Erdgasnetz eingespeist wird und somit kaum in Reinform erhältlich ist, sind rechtliche Nachweise für die Erfüllung gesetzlicher Vorgaben (EEG, RED, BImSchG) ebenfalls erschwert. Deswegen wird im Biogasregister die Menge und Qualität von ins Erdgasnetz eingespeistem Biomethan für die gesetzlich erforderlichen Dokumentationen verzeichnet. Durch das Register wird verhindert, dass dasselbe Biomethan zweimal verkauft bzw. zur Erfüllung der gesetzlichen Vorgaben zweifach angerechnet werden kann.

Unter Ökobilanzfachleuten wird die Anrechnung von Zertifikaten allerdings kritisch gesehen, teilweise sogar grundsätzlich abgelehnt, weil die Gefahr von Doppelzählungen droht, wenn die physische Identität nicht vorausgesetzt wird. Dieses Problem wird virulent, wenn z. B. ein und derselbe Stoff einmal separat bilanziert (z. B. CNG-Gas mit einem über gekaufte Zertifikate eingerechneten Biomethan-Anteil) und an anderer Stelle in den allgemeinen Mix eingerechnet wird. Dies kann auch durch die Führung des oben beschriebenen Registers nicht verhindert werden.

Aus diesem Grund heißt es in einschlägigen Methodenhandbüchern zur Ökobilanzierung, dass grüner Strom,

21 Erdgas hat bei atmosphärischem Druck eine geringe Dichte. Damit es im Fahrzeug eingesetzt werden kann, wird es zu CNG (*Compressed Natural Gas*) komprimiert.

22 AGE (2019).

23 BDEW (2017).

24 Viehmann et al. (2012).

25 dena (n. d.).

26 Registriert über das Nabisys der BLE (2019) im Jahr 2018 gemäß Biokraft-NachV (2009).

der per Zertifikat eingekauft wurde, im Rahmen eines Produktionsprozesses – zum Beispiel für die Fahrzeugherstellung – grundsätzlich nicht anzurechnen ist.²⁷ Dieser Grundsatz findet sich auch in der kürzlich revidierten RED II, die eine Anrechnung von EE-Strom bei E-Mobilität und der Produktion von PtX nur unter der Voraussetzung erlaubt, dass der Strom nicht dem Netz entnommen wird, sondern direkt von einer EE-Stromerzeugungsanlage stammt (siehe auch die Umsetzung dazu in der 37. und 38. BImSchV). Folgt man diesen methodischen Vorgaben, so sind bei der Berechnung von Ökobilanzen oder CO₂-Fußabdrücken tatsächliche Stoffströme zugrunde zu legen und nicht rechnerisch aus Bilanzanteilen hergeleitete Ketten zu definieren.

Beim Vergleich verschiedener Systeme oder Produkte muss mit dem gleichen Ansatz vorgegangen werden. Werden in einer Ökobilanz CNG-Zertifikate von eingekauftem Biomethan mit eingerechnet, so ist dieser Ansatz natürlich auch auf die zu vergleichenden Systeme anzuwenden. Im Falle eines Vergleichs von CNG und BEV kann es daher nicht sein, dass unterschiedlich vorgegangen wird und für BEV anstelle der Anrechnung von EE-Strom-Zertifikaten ein allgemeiner Strommix angesetzt wird. Da alle zu vergleichenden Optionen in dieser Studie mit dem gleichen Ansatz behandelt werden, kann für CNG in Analogie zu Benzin und Diesel nur der physische Anteil an Biomethan berücksichtigt werden, d. h. ein zu vernachlässigender Anteil von weniger als einem Prozent.

3.3 Wasserstoff, PtG und PtL

3.3.1 Voraussetzungen für die Deckung des künftigen Bedarfs an flüssigen oder gasförmigen Kraftstoffen

Neben den konventionellen und fortschrittlichen Biokraftstoffen dreht sich die Diskussion zunehmend um Energieträger wie Wasserstoff bzw. um flüssige und gasförmige Kraftstoffe, die aus Strom gewonnen werden. Auch für diesen Typus Kraftstoff bestehen Einschränkungen:

- Der spezifische Verbrauch an Energie zur Produktion von 1 MJ PtL oder PtG ist mit circa 5 MJ Strom sehr hoch (Siegemund & Schmidt 2017); für die Bereitstellung des gesamten Kraftstoffbedarfs werden somit sehr große Mengen an Strom benötigt.
- PtL und PtG setzen perspektivisch voraus, dass die erforderlichen Strommengen erneuerbar produziert werden – dies würde sehr große Mengen an EE-Strom erfordern. Diese zusätzliche Menge an erneuerbarem Strom wird aller Voraussicht nach nicht in Deutschland bereitgestellt werden können. Eine vollständige Dekarbonisierung bzw. Defossilisierung²⁸ mit diesem Typus Kraftstoff setzt daher Importe voraus; dies wird auch in allen großen Szenarien zum Klimaschutz unterstellt (Günther et al. 2019, Pfluger et al. 2018, Repenning et al. 2015).
- Die Importoption setzt voraus, dass in potenziellen Herkunftsländern nicht nur ein hohes Potenzial zur Erzeugung von erneuerbarem Strom existiert, sondern auch die entsprechenden Produktionskapazitäten für PtL und PtG errichtet werden.
- Der Bedarf an Kraftstoffen kann zwar auf diese Weise gedeckt werden; allerdings wäre sicherzustellen, dass neben dem ökonomisch und technisch anspruchsvollen Technologie-Hochlauf Nachhaltigkeitskriterien hinsichtlich politischer, sozialer und ökologischer Erfordernisse beachtet werden.²⁹

Sind diese Voraussetzungen erfüllt, steht also im Einklang mit Nachhaltigkeitskriterien erzeugter EE-Strom in ausreichender Menge zur Verfügung, dann ist ein Szenario mit vollständiger Deckung des künftigen Bedarfs an flüssigen oder gasförmigen Kraftstoffen möglich.

27 Siehe unter anderem bei: Itten et al. (2014) und Frischknecht (2013).

28 Der Begriff der Dekarbonisierung im Zusammenhang mit Energieträgern, deren Nutzung CO₂-Emissionen verursacht, wenngleich keine fossilen, ist in diesem Kontext unzutreffend. Daher wird hier der Begriff der Defossilisierung bevorzugt.

29 Zu Nachhaltigkeitskriterien siehe beispielsweise Kasten & Heinemann (2019).

Allerdings ist zu beachten, dass bestimmte Anwendungsbereiche in stärkerem Maße von dekarbonisierten Kraftstoffen abhängig sein werden als der Pkw-Bereich. Die Nutzung von strombasierten Kraftstoffen für Pkw ist im Rahmen dieser Studie deshalb nur von theoretischer Bedeutung, da diese Kraftstoffe aller Voraussicht nach im Flug- und Schiffsverkehr vonnöten sein werden.

3.3.2 Technologieauswahl

Zur Produktion von PtX steht eine breite Palette an Technologien und Technologiekombinationen zur Verfügung. Einen Eindruck davon vermitteln Ausfelder & Dura (2019).³⁰ Der Schlüsselprozess für sämtliche strombasierten Kraftstoffe ist die Wasserstoffherstellung, die strombasiert mittels einer elektrolytischen Spaltung von Wasser erfolgt. Hierzu stehen wiederum verschiedene Elektrolyse-Techniken zur Verfügung (z. B. Alkalische Elektrolyse, Polymer-Elektrolyt-Membran-Elektrolyse oder Hochtemperatur-Elektrolyse).

Aktuell sind die Chemie- und die Mineralölindustrie die größten Verbraucher von Wasserstoff (Ammoniaksynthese, Hydrierprozesse bei der Raffination von Mineralölprodukten). Der bei Weitem größte Anteil wird über die Dampfreformierung von Erdgas erzeugt. Über Elektrolyse werden derzeit lediglich 5 Prozent des Bedarfs gedeckt (DWV n. d.).³¹ Da die anderen Verfahren (derzeit) ausschließlich auf der Nutzung fossiler Wasserstoffquellen basieren, ist das Produkt kein erneuerbarer Wasserstoff.³² Grundsätzlich besteht auch die Möglichkeit, Biomasse einzusetzen (Dampfreformierung von Biomethan oder Vergasung fester Biomasse). Damit wird jedoch wiederum auf die nur begrenzt verfügbare Biomasse zurückgegriffen. Aus diesem Grund wird in der vorliegenden Studie nur die Technologie der Elektrolyse betrachtet.

30 Ausfelder, F. & Dura, H. (2019).

31 DWV (n. d.).

32 Der von Industriekreisen in die Diskussion gebrachte sogenannte „blaue Wasserstoff“ soll konventionell über Erdgasreformierung erzeugt und das gekoppelt entstehende CO₂ über das CCS-Prinzip gespeichert werden. Dieses Verfahren wird in dieser Studie nicht weiter betrachtet.

04 | Zentrale Aspekte der Klimabilanz verschiedener Antriebskonzepte

Ziel dieser Kurzstudie ist es, die Klimabilanz verschiedener Antriebskonzepte über ihren Lebensweg anhand eines Fallbeispiels zu vergleichen. Die Bilanzierung berücksichtigt dabei folgende Aspekte:

- Fahrzeugherstellung (inklusive Rohstoffgewinnung) und Entsorgung der Fahrzeuge
- Energieverbrauch, Wartung sowie gegebenenfalls direkte Auspuffemissionen
- Bereitstellung sämtlicher Energieträger

Die Herstellung von BEV, FCEV sowie CNG-Pkw ist fast immer mit höheren Klimagasemissionen verbunden als die Herstellung vergleichbarer ICEV (die auch synthetische Kraftstoffe nutzen können). Zunächst werden daher diese zusätzlichen Lasten der Fahrzeugherstellung und späteren Entsorgung ermittelt und miteinander verglichen. Die Klimawirkung der Fahrzeugnutzung hängt vor allem vom Energieverbrauch der Fahrzeuge ab sowie von den zur Bereitstellung der verschiedenen Energieträger entstehenden Klimabelasten. Auch diese werden hier zunächst einzeln abgeleitet und diskutiert.

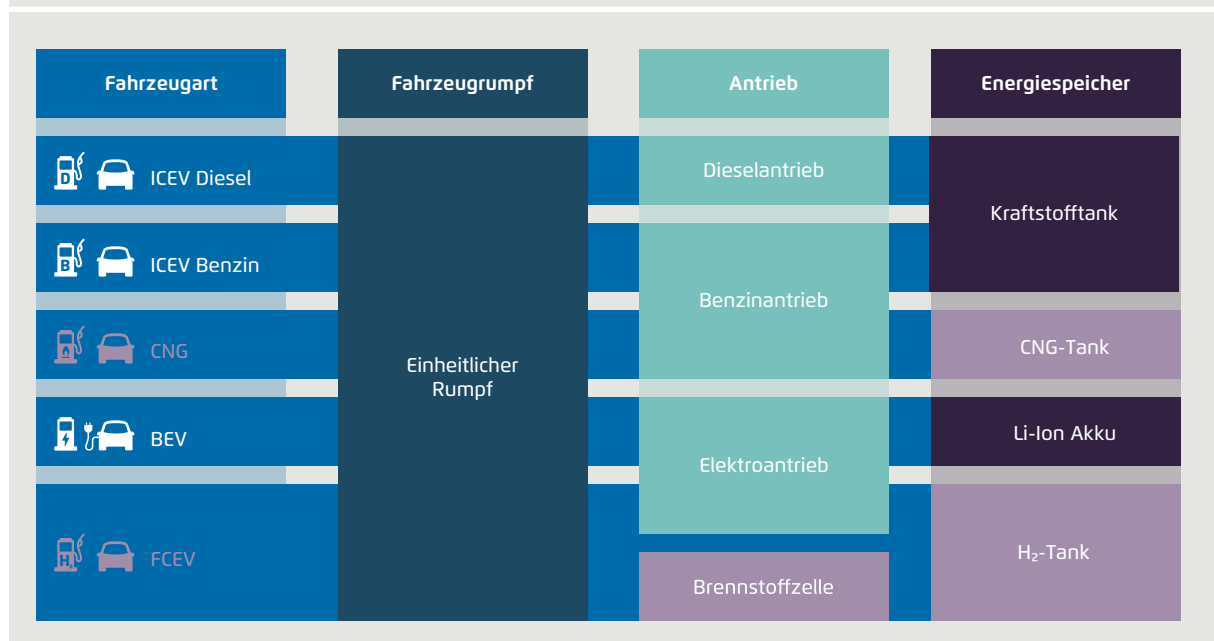
4.1 Fahrzeugherstellung, -wartung und -entsorgung

4.1.1 Datengrundlagen

Für ICEV und BEV wurde seitens des ifeu bereits in der Studie „Klimabilanz von Elektroautos“ (Agora Verkehrswende 2019 b) die Herstellung eines Beispielfahrzeugs der Kompaktklasse bilanziert. Diese Daten werden hier übernommen. Materialeitig wurde dabei ein für alle Antriebe gleicher Fahrzeugrumpf definiert. Zusätzlich wurden antriebspezifische Komponenten wie Motor (jeweils etwa 100 kW Motorleistung), Getriebe und Batterie sowie konzeptspezifische Zusatzbauteile berücksichtigt. Dabei stand nicht die exakte Abbildung eines speziellen Fahrzeugmodells im Vordergrund, sondern die Bilanzierung eines typischen Fahrzeugs der Kompaktklasse, mit Fokus auf die jeweils besonders relevanten Prozesse und Materialien. Die mit der Bereitstellung der Rohmaterialien verbundenen Umweltwirkungen sowie die Fahrzeugwartung wurden weitgehend mit Daten der Datenbank ecoinvent 3.4 (Wernet et al. 2016) bilanziert. Für das BEV in gemischter Nutzung wurde eine Batteriekapazität von

Schematischer Aufbau des Modells zur Fahrzeugherstellung

Abbildung 2



Hinweis: In den Kategorien Antrieb und Energiespeicher sind die antriebspezifischen Komponenten wie Motor, Getriebe und Batterie sowie weitere Zusatzbauteile sind je nach Fahrzeugkonzept unterschiedlich ausgeprägt (z. B. BEV mit kleinerem Getriebe als ICEV). Darstellung durch Agora Verkehrswende, ifeu

35 kWh angenommen, was etwa dem aktuellen VW eGolf als klassischem Fahrzeug der Kompaktklasse entspricht. Für das Fallbeispiel im Fernverkehr wurde eine Batteriekapazität von 60 kWh zugrunde gelegt.

Diese Bilanzierung wurde für die vorliegende Kurzstudie um ein CNG- und ein FCEV-Pkw erweitert. Um eine weitgehende Vergleichbarkeit der hier neu aufgenommenen Antriebskonzepte zu gewährleisten, wird für die Modellierung ein identischer Fahrzeugrumpf unterstellt. Neu modelliert wurden lediglich die abweichenden Fahrzeugkomponenten (siehe Abbildung 2, neue Fahrzeugtypen und Komponenten in lila).

Der (monovalente) CNG-Pkw ist in der Modellierung fast identisch mit einem Benzin-ICEV, lediglich der Benzintank wird durch einen CNG-Drucktank ersetzt. Modelliert wurde dabei ein Tank des Typs IV, der ausschließlich aus Kompositmaterialien besteht. Dieser Tanktyp wird heute im Pkw-Bereich bevorzugt eingesetzt, da er deutlich leichter als ein Stahltank ist

und damit keine zusätzlich verstärkte Tankaufhängung benötigt. Die Tankgröße wird mit heute in der Kompaktklasse üblichen 17,3 kg CNG bei 200 bar angenommen (siehe Tabelle 1). Nach Basshuysen (2015) wird dabei ein Tankgewicht von 0,35 kg pro Liter CNG angesetzt (dies entspricht etwa 2,2 kg Tankgewicht pro kg gespeichertes CNG), wobei von reinem karbonfaserverstärktem Kunststoff (CFK) ausgegangen wird. Am Markt gibt es alternativ auch Mischungen aus CFK und glasfaserverstärktem Kunststoff (GFK). Die übliche Motorleistung bei CNG-Pkw der Kompaktklasse liegt tendenziell knapp unter 100 kW (siehe Tabelle 1) und ist damit dem Benzinantrieb weitgehend vergleichbar.

Bei Brennstoffzellen-Pkw gibt es auf dem Markt erst wenige serienreife Modelle. Tabelle 2 zeigt eine Marktübersicht mit zentralen Fahrzeugeigenschaften. Bis auf den Honda Clarity sind diese Modelle auch in Deutschland erhältlich. Neben reinen FCEV-Fahrzeugen gibt es in Deutschland noch zwei Modelle (Mercedes GLC F-Cell und Renault Kangoo Z.E. Hydrogen bzw. Renault Master

Fahrzeugeigenschaften ausgewählter CNG-Pkw

Tabelle 1

Modell	Leistung in kW	Tankinhalt in kg
Mercedes B 200 c 7G-DCT	115	21
Opel Astra 1.4 ECOTEC CNG	81	19
VW Golf 1.5 TGI BlueMotion Comfortline	96	17,3
Audi A3 Sportback g-tron	96	17,3
Seat Leon ST 1.5 TGI	96	17,7

gibgas.de, ADAC und Herstellerangaben

Marktübersicht Brennstoffzellen-Pkw

Tabelle 2

Modell	Jahr	Reichweite km	Leistung kW	Verbrauch (H ₂) kombiniert in kg/100 km	Tankinhalt kg
Honda Clarity Fuel Cell	2016	650	130	0,77	5
Hyundai ix35 Fuel Cell	2013	594	100	0,95	5,64
Toyota Mirai	2014	500	114	0,76	5
Hyundai Nexo	2018	756	120	0,84	6,33

Herstellerangaben

Z.E. Hydrogen), die als Plug-In-Hybrid bzw. Range-Extender ausgeführt sind und daher neben einem kleineren Wasserstofftank noch eine Li-Ionen-Batterie haben.

Die Fahrzeugherstellung des FCEV basiert auf demselben elektrischen Antriebsstrang wie das BEV. Statt des großen Li-Ionen-Akkus beim BEV benötigt das FCEV nur eine sehr kleine Batterie (1,3 kWh), jedoch zusätzlich eine Brennstoffzelle und einen Wasserstofftank. Die Leistung der Brennstoffzelle wird analog zu der des Elektromotors angesetzt und liegt damit bei 100 kW. Für den Wasserstofftank wird eine marktgängige Tankgröße von 5 kg H₂ genommen, wie sie aktuell z. B. im Toyota Mirai verbaut ist (siehe Tabelle 2). Damit hat das FCEV eine Reichweite von etwa 500 Kilometern.

Am weitesten verbreitet sind aktuell Polymer-Elektrolyt-Brennstoffzellen (Proton Exchange Membrane Fuel Cell, kurz PEMFC). In Pkw werden wegen ihrer hohen Leistungsdichte aktuell ausschließlich PEMFC genutzt. Sie werden bei Temperaturen von 80°C betrieben und ermöglichen schnelle Lastwechsel, benötigen allerdings für den Betrieb sehr reinen Wasserstoff. Eine PEMFC-Brennstoffzelle besteht aus einer Bipolarplatte, die der Wasserstoffzufuhr dient, und einer Membran-Elektroden-Einheit (MEA), in der die Reaktion stattfindet. Die MEA besteht aus Anode, Kathode, Gasdiffusionsschichten und einer festen Polymermembran. Die Polymermembran dient als Elektrolyt und ist mit Platin als Katalysator beschichtet. Neben dem eigentlichen Brennstoffzellen-Stack sind weitere Peripheriekomponenten notwendig. Diese dienen der Zufuhr von Wasserstoff sowie von Kühlluft und bestehen aus weiteren elektrischen Bauteilen. Die hier bilanzierte Brennstoffzelle basiert weitgehend auf Simons & Bauer (2015).

Da Wasserstoff eine geringe volumetrische Energiedichte aufweist, wird er im Pkw üblicherweise in Drucktanks bei 700 bar gespeichert. Diese Drucktanks bestehen zunächst aus einem Linermaterial (z. B. aus Polyethylen mit hoher Dichte, HDPE), einem Gehäuse aus karbon- oder glasfaserverstärktem Kunststoff und einer Schaumisolierung. Die hier bilanzierte Materialzusammensetzung des Wasserstofftanks basiert auf Elgowainy et al. (2016).

Die Entsorgung des Li-Ionen-Akkus für das BEV erfolgt durch ein pyrometallurgisches Verfahren und ist in der Studie von Agora Verkehrswende (2019b) bereits

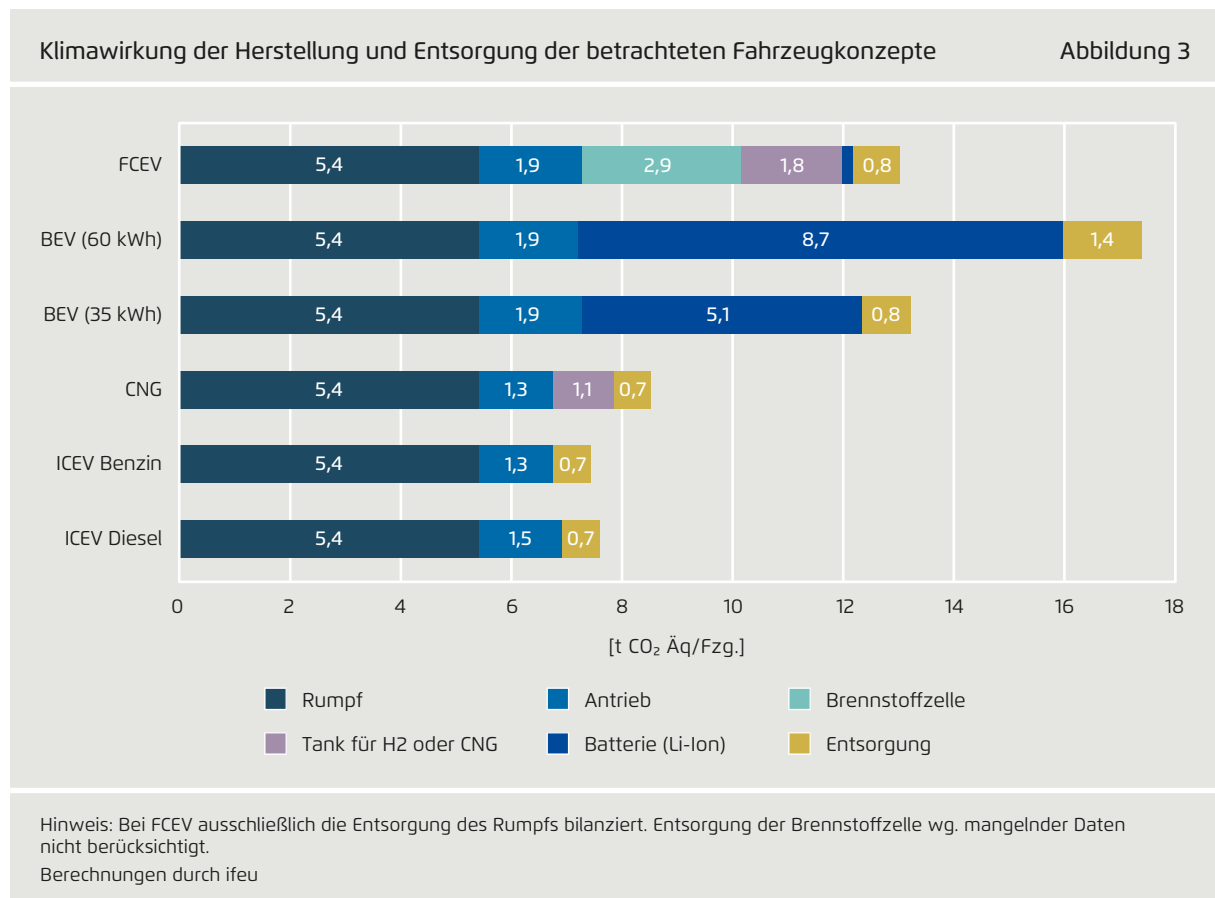
beschrieben. Eine Entsorgung der Brennstoffzelle konnte dagegen nicht bilanziert werden, da es hierfür aktuell weder Anlagen noch Daten gibt. Da die meisten Teile einer Brennstoffzelle mit herkömmlichen Verfahren recycelt werden können, dürften die Lasten aus der Entsorgung relativ gering ausfallen. Theoretisch können die in der Brennstoffzelle verbleibenden Metalle zu mehr als 95 Prozent wiederverwertet werden. Insbesondere ein Platinrecycling ist in Zukunft aufgrund der hohen Platinkosten sowie der ebenfalls hohen Klimawirkungen von Platin sinnvoll.

Bilanziert wurden die Zusatzkomponenten von FCEV und CNG-Pkw mit Hintergrunddaten aus der ecoinvent Datenbank (Wernet et al. 2016) in der Version 3.5. Da für FCEV und CNG-Pkw keine technologiespezifischen Daten zur Fahrzeugwartung vorliegen, wurden für CNG-Pkw die Daten für ICEV und für FCEV die Angaben für BEV übernommen.

4.1.2 Klimawirkung der Fahrzeugherstellung

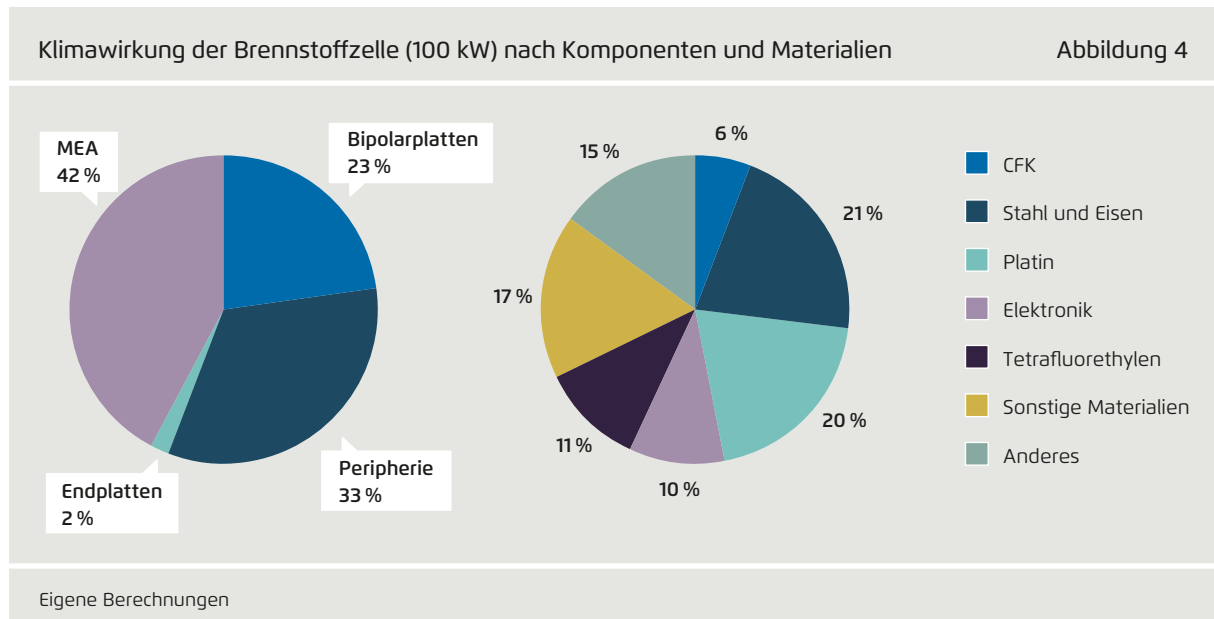
Der Vergleich der betrachteten Konzepte zeigt die niedrigste Klimawirkung der Fahrzeugherstellung und -entsorgung für das ICEV. Hier schneidet der Diesel aufgrund der aufwendigeren Abgasnachbehandlung geringfügig schlechter ab als der Benziner. Beim CNG-Pkw verursacht der CFK-Tank zusätzliche Treibhausgasemissionen im Bereich von etwa einer Tonne. Eine deutlich höhere Klimawirkung ist mit der Herstellung und Entsorgung des FCEV und BEV verbunden. Bei einer Batteriekapazität von 35 kWh ist die Klimawirkung des BEV noch vergleichbar mit der des FCEV. Ein auf größere Reichweiten ausgelegtes BEV mit 60 kWh Batteriekapazität verursacht in der Herstellung jedoch rund 3,5 Tonnen mehr Treibhausgasemissionen als die Herstellung des betrachteten FCEV.

Beim FCEV besonders relevant ist die Brennstoffzelle selbst, mit Lasten von 29 kg Treibhausgasemissionen pro kWh Leistung. Dies liegt etwa in der Mitte der in der Literatur gefundenen Werte, die pro kW Leistung eine Bandbreite von 18 bis 45 kg Treibhausgasemissionen aufweisen (siehe Tabelle 5 im Anhang). Die Herstellung des Wasserstofftanks führt zusätzlich zu fast 2 Tonnen Treibhausgasemissionen. Die Klimabelastungen des Tanks liegen damit nur etwa eine Tonne niedriger als die der Brennstoffzelle selbst, die mit 2,9 Tonnen zu Buche schlägt. In der Brennstoffzelle sind verschiedene



Komponenten verantwortlich für die Klimawirkung, insbesondere die Membran-Elektroden-Einheit (MEA) (42 Prozent), die Peripherie (33 Prozent) sowie die Bipolarplatten (23 Prozent) (siehe Abbildung 4).

Für die Klimawirkung des Wasserstofftanks ist vor allem die Herstellung des mit Karbonfaser verstärkten Kunststoffs (CFK) verantwortlich. Von den Materialien in der Brennstoffzelle haben Platin und Tetrafluorethylen die höchsten Klimalasten; sie werden in der Membran-Elektroden-Einheit (MEA) verbaut. Weiterhin relevant sind der in den Bipolarplatten verbaute Chromstahl sowie die vor allem in der Peripherie verwendeten elektronischen Bauteile.



4.2 Klimawirkung der Fahrzeugnutzung

In der Studie „Klimabilanz von Elektroautos“ (Agora Verkehrswende 2019b) wurde der Verbrauch des Beispielfahrzeugs der Kompaktklasse mit weitgehend vergleichbaren Fahrzeugparametern für das Innerorts-, Landstraßen- und Autobahnprofil des ADAC-Ecotests modelliert.³³ Dabei wurden auch typische Nebenverbraucher (wie z. B. Licht und Grundlast der Klimaanlage³⁴) berücksichtigt. Die für ICEV sowie den BEV in der „Klimabilanz von Elektroautos“ ermittelten Werte werden hier beibehalten (siehe Tabelle 4).

Für die gemischte Nutzung wurden die einzelnen Straßenkategorien nach der mittleren Fahrleistung von Pkw der Kompaktklasse in Deutschland nach TREMOD (ifeu

2016) im Verhältnis von 30 Prozent innerorts, 40 Prozent außerorts und 30 Prozent Autobahn gewichtet. Für das Elektroauto resultiert ein mittlerer Verbrauch ohne Ladeverluste von etwa 16 kWh pro 100 km. Ein solcher Verbrauch liegt auch im Rahmen dessen, was Verbraucherinnen und Verbraucher aus der Praxis berichten.³⁵ Für Autobahnfahrten zeigen sich jedoch deutlich höhere Energieverbräuche (siehe Tabelle 4). Zusätzlich entstehen Ladeverluste, die auf Basis von Daten des ADAC (2018) mit 15 Prozent veranschlagt wurden. Das bedeutet, dass pro kWh Batterieladung dem Stromnetz tatsächlich 1,15 kWh Strom entnommen werden und entsprechend zusätzlich erzeugt werden müssen.

Eine vergleichbare Modellierung ist für FCEV und CNG-Pkw in diesem Rahmen nicht möglich, da zu wenige Daten zu Motorkennfeldern und Wirkungsgraden vorliegen. Daher müssen hier weitere Datenquellen verwendet werden, auch wenn dadurch die Vergleichbarkeit der Verbrauchswerte möglicherweise eingeschränkt ist.

Bei CNG-Pkw ist die Modellverfügbarkeit begrenzt. Bezüglich des Realverbrauchs wurde hier auf die im ADAC-Ecotest erhobenen Daten zurückgegriffen (ADAC 2019 a). Der Ecotest bildet ein weitgehend realistisches

33 Das eingesetzte Fahrzeugmodell VEHMOD ist u. a. dokumentiert in Kräck et al. (2015). Modelliert wurde ein Pkw der Kompaktklasse in Anlehnung an den VW e-Golf, dessen technische Parameter dem hier angesetzten Fallbeispiel entsprechen.

34 Der Zusatzverbrauch durch Klimatisierung kann abhängig von der Witterung, der individuellen Nutzung (jahres- und tageszeitlich sowie nach Straßenkategorie) und der Klimatisierungsstrategie des Fahrzeugs stark variieren. Temporär sowie fahrzeug- und nutzerspezifisch sind daher deutliche Abweichungen möglich.

35 Verbrauchsangaben zur Kompaktklasse (z. B. e-Golf) auf dem Onlineportal www.spritmonitor.de.

Verbrauchswerte für ausgewählte Erdgas-Pkw der unteren Mittelklasse

Tabelle 3

	NEFZ	Ecotest		
		Innerorts	Außerorts	Autobahn
VW Golf 1.5 TGI BlueMotion Comfortline	3,6	4,3	3,5	4,4
Mercedes B 200 c 7G-DCT	4,2	5,3	3,9	5,0
Opel Astra 1.4 ECOTEC CNG	4,1	4,6	3,7	4,7
Mittelwert	4,0	4,7	3,7	4,7

ADAC 2019 a

Fahrverhalten ab und berücksichtigt auch Nebenverbraucher. Für die untere Mittelklasse lagen jedoch nur Tests von drei Modellen vor. Der mittlere NEFZ-Verbrauch dieser Modelle liegt bei 4,0 kg/100 km, der mittlere Verbrauch im Ecotest schwankt zwischen 3,7 kg auf Landstraßen und 4,7 kg auf der Autobahn (siehe Tabelle 3). Für den gemischten Betrieb wurden die mittleren Werte für die einzelnen Straßenkategorien analog der Verbrauchswerte für ICEV und BEV im Verhältnis von 30 Prozent innerorts, 40 Prozent außerorts und 30 Prozent Autobahn gewichtet. Daraus ergibt sich ein Verbrauch für gemischten Betrieb von 4,3 kg/100 km.

Da bisher auch nur wenige Modelle von FCEV auf dem Markt sind, liegen über die Typprüfwerte im NEFZ hinausgehend nur wenige Daten zum Realverbrauch vor. Diese repräsentieren in der Regel jedoch größere Fahrzeugsegmente als das Beispielfahrzeug. Die Typprüfwerte der derzeit auf dem Markt verfügbaren Fahrzeugmodelle liegen im Mittel bei 0,83 kg H₂ pro 100 km (siehe Tabelle 2). Ein Test des ADAC (ADAC 2019 b) mit dem Toyota Mirai ergab dagegen einen Realverbrauch von etwa 1 kg/100 km, was gut 30 Prozent über dem NEFZ Wert von 0,76 kg/100 km liegt. Angaben in einem ähnlichen Bereich wurden in einem weiteren Alltagstest mit dem Mirai (Schwarzer 2018) festgestellt: „Der Toyota Mirai brauchte von minimal 0,7 kg im gemächlichen Stadtverkehr bis 1,6 kg bei Vollgasfahrt. Bei gesitteter Autobahnfahrt waren es 1 bis 1,3 kg und im Überlandbetrieb 0,9 kg. Im Mittel ergaben sich trotz des hohen Autobahnanteils 1,1 kg auf 100 Kilometer.“ Nach Hollweck et al. (2018) ergaben sich ähnliche Werte, die in Deutschland bei 1 kg/100 km für den gemischten Betrieb und bei

0,8 kg/100 km auf Landstraßen liegen. Daher wird hier als Realverbrauch in den marktgängigen Segmenten für die gemischte Fahrweise von 1 kg H₂ pro 100 km ausgegangen und für die Autobahn von einem geringfügig höheren Realverbrauch von 1,2 kg/100 km.

Zusätzlich wird für das Beispielfahrzeug eine Verbrauchskorrektur auf Basis des niedrigeren Leergewichtes vorgenommen. Das Leergewicht des FCEV-Beispielfahrzeugs liegt mit 1538 kg etwa 20 Prozent niedriger als der Toyota Mirai mit 1925 kg. Der Verbrauchseffekt für das Beispielfahrzeug kann dabei nur näherungsweise abgeschätzt werden. Auf Basis von (Helms et al. 2003) und (Helms & Kräck 2016) wird pro 10 Prozent Gewichtsreduktion eine Verbrauchsreduktion von 4 Prozent angenommen. Damit ergibt sich für das FCEV-Beispielfahrzeug ein Verbrauch von 0,92 kg H₂ pro 100 km für den gemischten Betrieb und 1,1 kg H₂ pro 100 km auf der Autobahn.

Tabelle 4 fasst die verwendeten Verbrauchswerte für die gemischte Nutzung und den Autobahneinsatz aller betrachteten Antriebskonzepte zusammen. Der Verbrauch auf Autobahnen liegt dabei durchweg höher als im gemischten Betrieb. Der Abstand ist mit 11 Prozent am geringsten für den CNG-Pkw und mit etwa 40 Prozent am höchsten für das BEV. Hier wirkt sich der zusätzliche Energieverbrauch durch den hohen Luftwiderstand auf Autobahnen nahezu unmittelbar auf den Verbrauch aus, während er beim Verbrenner dagegen teilweise durch einen besseren Motorwirkungsgrad im Vollastbereich kompensiert wird.

Verbrauchswerte nach ifeu-Modellierung eines generischen Kompaktklassefahrzeugs

Tabelle 4

pro 100 km	ICEV Benzin	ICEV Diesel	BEV*	FCEV	CNG
Autobahn	6,7 l	5,7 l	22,7 kWh	1,1 kg	5,1 kg
Gemischt**	5,9 l	4,7 l	16,0 kWh	0,92 kg	4,6 kg

* Ohne Ladeverluste.

** Die einzelnen Strassenkategorien wurden nach der mittleren Fahrleistung von Pkw der Kompaktklasse in Deutschland nach TREMOD (ifeu (2016)) im Verhältnis von 30 % innerorts, 40 % auserorts und 30 % Autobahn gewichtet.





4.3 Klimawirkung der Energiebereitstellung

In der vorliegenden Studie werden neben den herkömmlichen Kraftstoffen (Benzin, Diesel) und Strom weitere Energieträger bilanziert: Erdgas, Wasserstoff und strombasierte Kraftstoffe für ICEV. Wie im Kapitel 3.1. erläutert, werden andere Alternativen wie Biokraftstoffe nicht weiter betrachtet. Abbildung 5 zeigt die Auswahl an Kraft-

stoffoptionen, die für das Fallbeispiel bilanziert werden. Als Referenzkraftstoff für die FCEV wäre Wasserstoff aus der Dampfreformierung von Erdgas zwar denkbar, aber langfristig nicht zielführend, denn erdgasbasierter Wasserstoff stammt aus fossilen Quellen. Eine weitere Dekarbonisierung des Verkehrs, sei es über die Option Brennstoffzelle oder über PtL/PtG, ist auf den Ausbau von grünem Wasserstoff auf Basis erneuerbaren Stroms (PtH₂) angewiesen.

Betrachtete Antriebs- und Kraftstoffoptionen

Abbildung 5

Fahrzeugart	Referenzkraftstoff	Alternativer Kraftstoff
 ICEV Diesel	Dieselmotorkraftstoff (6,4% Biodieselanteil)	PtL
 ICEV Benzin	Benzin (3,5% Bioethanolanteil)	
 CNG	Erdgas CNG	PtG CNG
 FCEV		PtH ₂

Hinweis: Hellgrün dargestellt die Optionen, die deckungsgleich sind mit der Studie "Klimabilanz von Elektroautos".
Lila dargestellt die Optionen, die in dieser Studie zusätzlich betrachtet werden.

Berechnungen durch ifeu

4.3.1 Konventionelle Kraftstoffe (Benzin, Diesel, Erdgas)

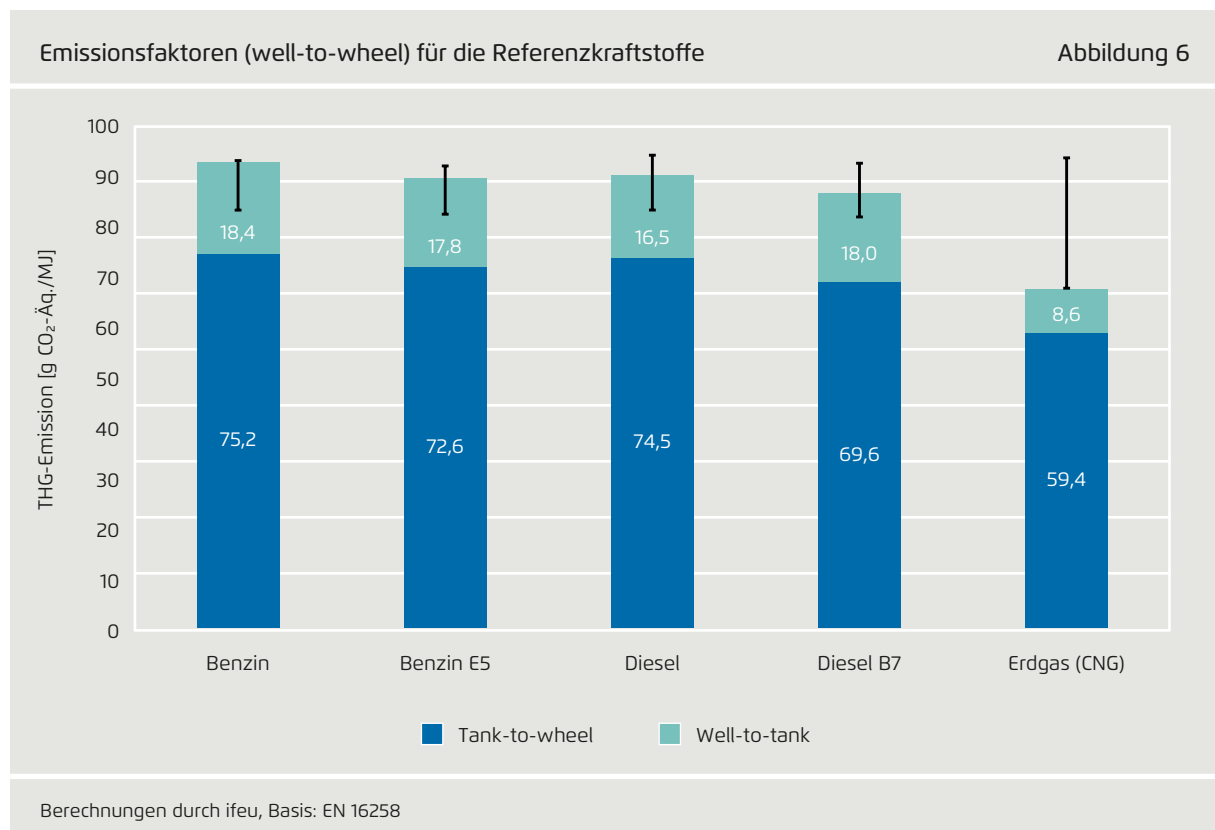
In der Studie „Klimabilanz von Elektroautos“³⁶ bilden konventionelles Benzin (E5) und Dieseldieselkraftstoff (B7) die fossile Referenz, wobei auf den Energiegehalt bezogene Anteile von 6,4 Prozent Biodiesel und 3,5 Prozent Bioethanol berücksichtigt sind. Dies entspricht bei Diesel ziemlich genau dem im Jahr 2018 enthaltenen Anteil an Biodiesel, bei Benzin lagen die nach BLE angerechneten Ethanolanteile mit 4,4 Prozent etwas höher. Neu hinzu kommt die Referenz für das CNG-Fahrzeug: konventionelles CNG aus Erdgas. Für die im folgenden Kapitel durchgeführten Klimabilanzrechnungen werden für die Energieträger jeweils spezifische Emissionsfaktoren zugrunde gelegt, diese beziehen den gesamten Herstellungsprozess mit ein. Wie für die alternativen Energieträger haben auch die Emissionsfaktoren für die Referenzkraftstoffe eine gewisse Bandbreite, die hier jedoch weitaus enger ausfällt. In dieser Studie werden wie in der „Klimabilanz von Elektroautos“ die Emissions-

faktoren gemäß DIN EN 16258³⁷ aus dem DSLV-Leitfaden (Schmied & Knörr 2013) als Grundlage herangezogen, um die Vergleichbarkeit der Ergebnisse zu gewähren. Für CNG wurde im Emissionsfaktor auch der Energieverbrauch für die Kompression auf 200 bar berücksichtigt. Die Berechnung und Hintergrunddaten dazu wurden durch das ifeu anhand eigener Bilanzmodelle sowie gegenüber den Standardemissionswerten der RED, RED II (Benzin, Diesel) und der Richtlinie (EU) 2015/652³⁸ als aktuell zutreffend geprüft. Abbildung 6 zeigt die hier zugrunde gelegten Faktoren, differenziert nach *Well-to-Tank* (Kraftstoffvorkette) und *Tank-to-Wheel* (diese Emission tritt erst bei der Nutzung auf, wird für die fossilen Kraftstoffe jedoch aus Transparenzgründen hier mit aufgeführt). Ebenso dargestellt sind die sich aus den genannten Standardwerten ergebenden Bandbreiten. Diese sind bei den flüssigen Kraftstoffen vergleichsweise

36 Agora Verkehrswende (2019b).

37 Methode zur Berechnung und Deklaration des Energieverbrauchs und der Treibhausgasemissionen bei Transportdienstleistungen.

38 Richtlinie (EU) 2015/652 (2015).



eng. Bei Erdgas-CNG bilden die hier zugrunde gelegten Emissionswerte den unteren Rand der Bandbreite. Nach Hausmann et al. (2016) erreicht die Bandbreite sogar die oberen Werte der flüssigen Kraftstoffe unter der Annahme, dass die Methanleckagen bei Förderung und Transport unterschätzt sind und das Fünffache der Annahme bei Standardwert erreichen können. Der Anteil des einbezogenen Bio-CNGs beläuft sich auf etwas weniger als ein Prozent aus den in Kapitel 3.2. dargelegten Gründen.

4.3.2 Strom

Wegen des hohen spezifischen Stromverbrauchs für die Herstellung strombasierter Energieträger ist die Art und Weise der Stromerzeugung der entscheidende Faktor für die Klimagasemissionen. In der Studie „Klimabilanz von Elektroautos“ diente Strom allein dem Antrieb des BEV. Die geplanten Ausbauziele für erneuerbare Energien lassen den Schluss zu, dass sich die Klimabilanz der Strombereitstellung für alle Nutzer in Deutschland kontinuierlich verbessert; dies bilden auch die „Langfrist- und Klimaszenarien“ des Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (n. d.) ab. Pehnt et al. (2018) quantifizieren für das Basisszenario einen Rückgang von fast 570 g CO₂-Äq. in 2016 auf gut 380 Gramm CO₂-Äq. pro kWh Strom bis 2030. In diesem Basisszenario werden die energie- und klimapolitischen Ziele zu möglichst geringen Systemkosten erreicht. Die Reduktion der Treibhausgasemissionen bis 2050 entspricht gegenüber 1990 jedoch nur 80 Prozent und liegt damit am unteren Ende des Zielkorridors von 80 Prozent bis 95 Prozent.

Der weitere Ausbau erneuerbarer Energien verbessert nicht nur die Klimabilanz der im Bezugsjahr 2018 neu zugelassenen BEV bis 2030, sondern verringert auch die Klimagasemissionen bei der Herstellung von Wasserstoff, PtL und PtG. Um die voraussichtliche Entwicklung des Strommix bis dahin für jedes Jahr abzubilden, werden die spezifischen Treibhausfaktoren für die Strombereitstellung nach Pehnt et al. (2018) zwischen den Stützjahren 2016, 2020, 2025 und 2030 linear interpoliert. Zusätzlich erfolgt eine Berücksichtigung der mit dem Fahrzeugalter tendenziell abnehmenden Jahresfahrleistung nach der Methodik des ifeu (2016). Für die heute zugelassenen Fahrzeuge ergibt sich damit nach dem Basisszenario der Langfrist- und Klimaszenarien eine mittlere Klimawirkung der Strombereitstellung von etwa 421 Gramm CO₂-Äq. pro kWh. Dieser Emissionsfaktor wird in dieser

Kurzstudie aus Gründen der Gleichbehandlung und Konsistenz auch für Erzeugung von Wasserstoff und PtX verwendet.

4.3.3 Wasserstoff, PtG und PtL

Als strombasiert werden in der vorliegenden Studie flüssige Kraftstoffe (PtL), gasförmige Kraftstoffe (PtG) und Wasserstoff (PtH₂) unterschieden. Diese gleichen sich in den ersten Gliedern der Herstellungskette. Allen gemein ist die Erzeugung von Wasserstoff durch elektrolytische Spaltung von Wasser. PtG und PtL werden daraus, wenn dem Wasserstoff mittels eines spezifischen Syntheseprozesses – z. B. der Fischer-Tropsch-Synthese – CO₂-Moleküle hinzugefügt werden und auf diese Weise für Benzin- oder Dieselmotoren geeignete Kohlenwasserstoffketten entstehen. Ein stark vereinfachtes Schema der Herstellung zeigt Abbildung 7. Jedes der darin gezeigten Module kann stark variieren: die Art des Stroms (reiner EE-Strom oder Strommix), die CO₂-Quelle (aus der Luft oder aus einer technischen Quelle), die Technologie für Elektrolyse und Synthese. Hinzu kommen weitere Faktoren wie die Wasseraufbereitung, die Speicherung und der Transport.

Angesichts der Vielfalt an Variationsmöglichkeiten für PtX-Herstellungspfade hat das ifeu ein Gesamtmodell für die Ökobilanzierung dieser Optionen entwickelt. Dieses Modell wird in verschiedenen aktuellen Arbeiten des ifeu zur Ökobilanzierung von PtX eingesetzt und weiterentwickelt.³⁹ Aus diesem Modell, gekoppelt mit den bereits genannten Stromkennziffern, werden Emissionsfaktoren über den gesamten Herstellungsprozess ermittelt.

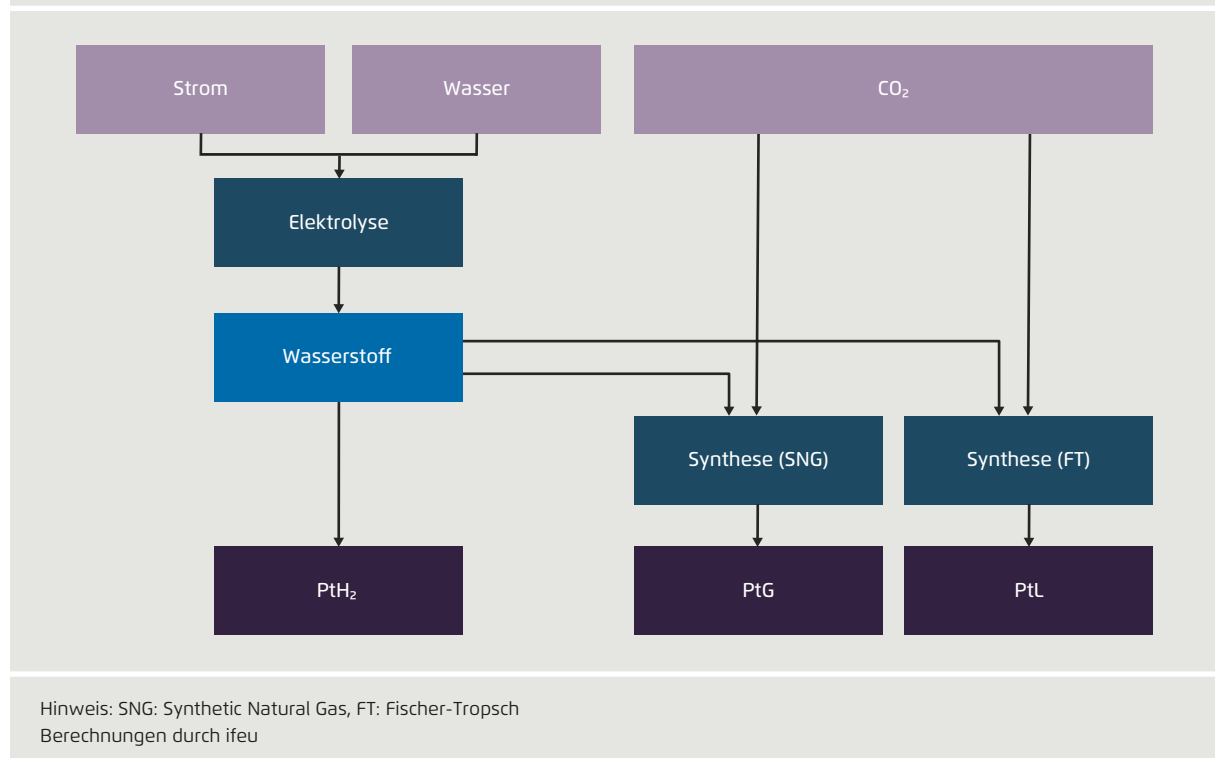
In Abbildung 8 sind die Emissionsfaktoren der betrachteten Kraftstoffe für die gesamte Kraftstoffbereitstellung (*Well-to-Tank*) zusammengestellt. Dargestellt werden die Treibhausgasemissionen pro MJ Endprodukt, also ein Megajoule PtH₂, PtG oder respektive PtL.⁴⁰ Als Basis für

39 Projekte: BMBF-Kopernikus-Projekt Power-to-X: <https://www.ifeu.de/projekt/kopernikus-projekt-power-to-x/> und https://www.ifeu.de/wp-content/uploads/ifeu_paper_03_2019_CO2-Quellen-f%C3%BCr-PtX.pdf; UBA-Projekt SYSEET: <https://www.ifeu.de/projekt/syseet/>; BMBF-Projekt CORAL: <https://www.ifeu.de/projekt/coral/>

40 Da hier nur *Well-to-Tank* abgebildet ist, spielen die unterschiedlichen Wirkungsgrade von Elektromotor einerseits und Verbrennungsmotor andererseits für diese Betrachtung keine Rolle.

Stark vereinfachtes Schema der Produktionskette strombasierter Kraftstoffe

Abbildung 7

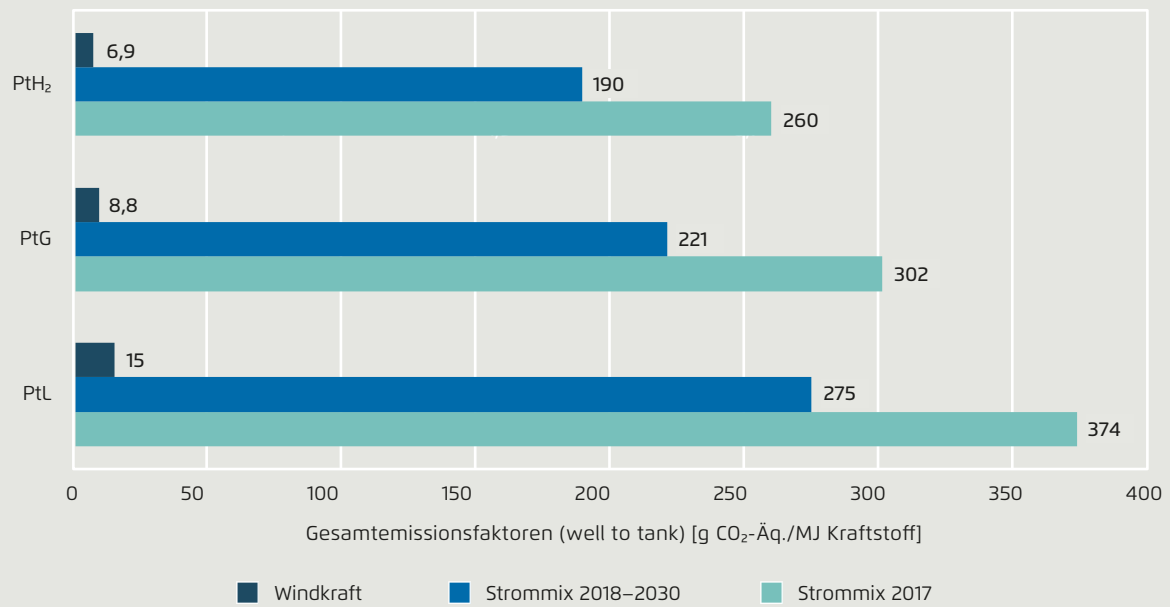


die Bilanzierung in dieser Kurzstudie werden die Faktoren auf der Basis des mittleren Strommix von 2018 bis 2030 angesetzt. Zum Vergleich werden auch die Faktoren mit Strommix (2017) und mit Windkraft dargestellt.

Es zeigen sich gerade mit Blick auf die Emissionsfaktoren und Bandbreiten der Referenzkraftstoffe (siehe Abbildung 6) sehr starke Unterschiede. Zunächst ist der Anstieg der Emissionsfaktoren von PtH_2 über PtG zu PtL aufgrund des zunehmenden Syntheseaufwands zu erkennen. Deutlich größeren Einfluss hat jedoch der zugrunde gelegte Strom, v. a. wegen des sehr hohen spezifischen Strombedarfs der Elektrolyse. Während sich beim Einsatz von Windkraft die Well-to-Tank-Emissionen zwischen 7 bis 15 g CO_2 -Äq. pro MJ Kraftstoff bewegen, werden beim Ansatz des aktuellen Strommix 260 bis 370 g CO_2 -Äq. pro MJ Kraftstoff emittiert. Die für diese Studie zugrunde gelegten Emissionsfaktoren auf der Basis des mittleren Strommix von 2018 bis 2030 führen zu 190 Gramm für PtH_2 , 221 Gramm für PtG und 275 Gramm CO_2 -Äq. pro MJ für PtL .

Gesamtemissionsfaktoren für die Bereitstellung von PtL, PtG und PtH₂ (well-to-tank) mit drei verschiedenen Stromvorketten

Abbildung 8



Hinweis: CO₂-Quelle direkt aus der Luft abgeschieden.
Berechnungen durch ifeu

05 | Klimabilanz der Fallbeispiele über den gesamten Lebensweg

Die folgenden Ergebnisse für eine Klimabilanz der berücksichtigten Antriebskonzepte und Energieträger über den gesamten Lebensweg zeigen einen Ausschnitt der Diskussion um den Einsatz strombasierter Alternativen anhand von zwei Fallbeispielen. Damit ersetzen sie keine umfassende Studie zu allen Aspekten der betrachteten Antriebskonzepte. Im Vordergrund steht die Vergleichbarkeit der energiewirtschaftlichen Rahmenbedingungen. Dies unterstützt die technische Einordnung der Antriebskonzepte und Energieträger sowie die Identifizierung ihrer jeweiligen Stärken und Schwächen. Durch die grundlegenden Unterschiede in den Antriebskonzepten kann das Fallbeispiel allerdings weder eine 100-prozentige Vergleichbarkeit herstellen noch für alle betrachteten Antriebskonzepte repräsentativ sein.

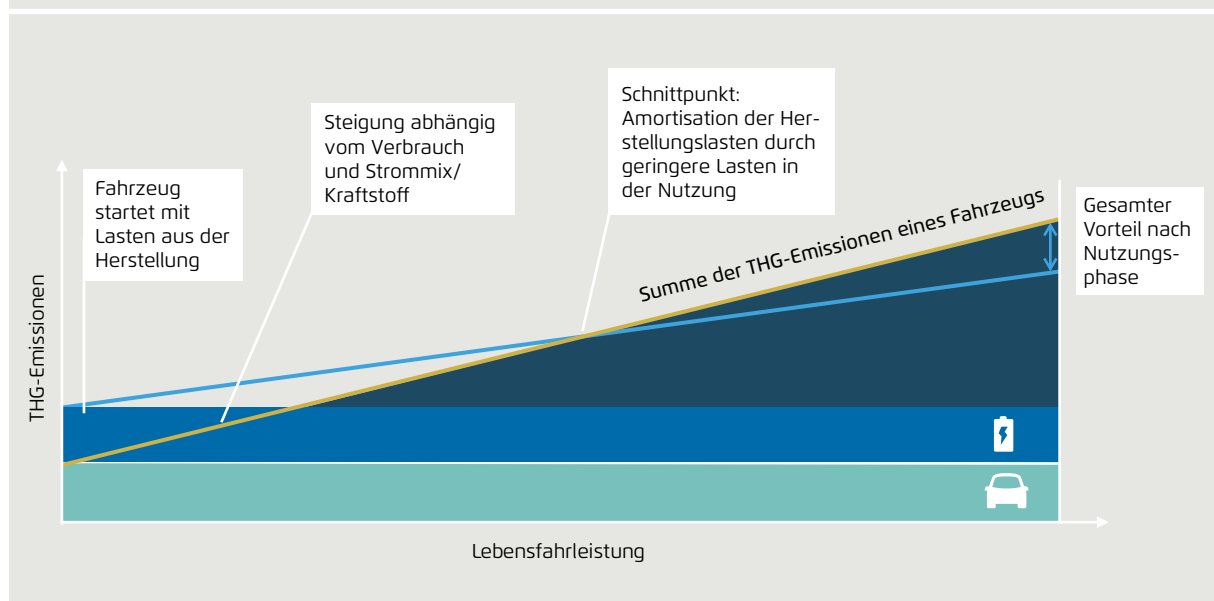
Betrachtet werden Pkw in ihrem heutigen Entwicklungsstand und mit einer Nutzung im Zeithorizont bis 2030. Für alle alternativen Pfade wird jeweils der gleiche mittlere Strommix in Deutschland angenommen. Eine Aussage über das weitere Entwicklungspotenzial der jeweiligen Antriebe und Energieträger wird damit nicht getroffen, ebenfalls haben die Ergebnisse keine Aussagekraft über den Einsatz der Energieträger in anderen Fahr-

zeugtypen, z. B. im Schwerlast- oder Flugverkehr. Hier kann die Bewertung von Wasserstoff und synthetischen Kraftstoffen anders ausfallen. Da die Rahmenbedingungen und Datengrundlagen sich ständig weiterentwickeln, zeigen die Ergebnisse also eine Momentaufnahme des aktuellen Entwicklungsstandes im Bereich Pkw.

Über den gesamten Lebensweg müssen einerseits die einmalig anfallenden Emissionen der Herstellung und Entsorgung berücksichtigt werden (siehe Kapitel 4.1), andererseits die nutzungsbedingten Emissionen (Auspuffemissionen, Energiebereitstellung und Wartung, siehe Kapitel 4.2), die aber in der Regel fahrleistungsabhängig sind. Der Lebensfahrleistung kommt für die Gesamtbilanz der Fallbeispiele daher eine zentrale Bedeutung zu, insbesondere für Fahrzeuge mit hohen Klimabelasten aus der Fahrzeugherstellung. Sofern diese Fahrzeuge ICEV mit nur geringer Lebensfahrleistung ersetzen, schneiden sie in der Klimabilanz tendenziell schlecht ab. Die Klimabilanz der verschiedenen Fallbeispiele wird daher in Abhängigkeit der Lebensfahrleistung dargestellt (siehe Schema in Abbildung 9). Damit kann auch der potenzielle Einsatz im Fernverkehr mit tendenziell höheren Lebensfahrleistungen abgebildet werden.

Schematische Darstellung der Treibhausgasemissionen eines ICEV und BEV in Abhängigkeit der Lebensfahrleistung

Abbildung 9



Eigene Darstellung durch ifeu

5.1 Ergebnisse für konventionelles und synthetisches Erdgas

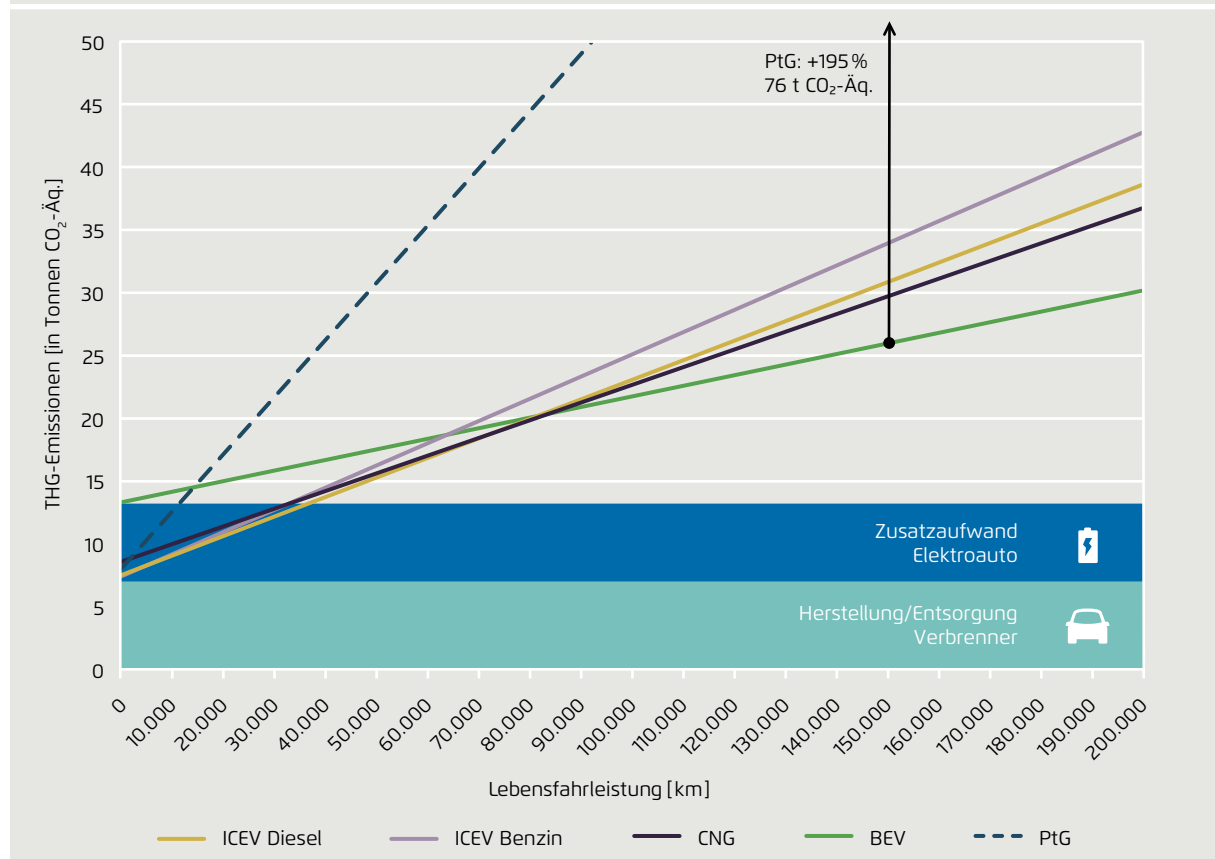
Abbildung 10 zeigt einerseits die bereits in der „Klimabilanz von Elektroautos“ (Agora Verkehrswende 2019b) dargestellten Ergebnisse für das mit konventionellem Benzin und Diesel betriebene ICEV und das BEV und stellt diese der hier neu durchgeführten Bilanzierung für das Gasfahrzeug im Betrieb mit konventionellem CNG sowie mit synthetischem PtG gegenüber. Benzin- und Diesel-ICEV zeigen die niedrigste Klimawirkung bei der Herstellung und Entsorgung, die im Bereich von gut 7 Tonnen Treibhausgasemissionen liegt. Der nutzungsbedingte Klimabeitrag ist dann direkt von der Lebens-

fahrleistung abhängig und dominiert ab etwa 50.000 km die Gesamtbilanz. Bei einer Lebensfahrleistung von 150.000 km liegt der Herstellungs- und Entsorgungsbeitrag zur Klimawirkung über den gesamten Lebensweg bei 25 Prozent für den Diesel-ICEV und 22 Prozent für den Benzin-ICEV.

Das bereits in der „Klimabilanz von Elektroautos“ bilanzierte Fallbeispiel des BEV hat dagegen deutlich höhere herstellungsbedingte Klimalaisten, kann diese aber durch die geringere Klimawirkung im Betrieb ab einer Lebensfahrleistung von 60.000 km gegenüber dem Benzin-ICEV und 80.000 km gegenüber dem Diesel-ICEV ausgleichen. Eine Verbesserung des Strommix durch die Energie-

Treibhausgasemissionen des Beispielfahrzeugs der Kompaktklasse (ICEV, BEV, CNG (konventionell und PtG)) in gemischter Nutzung über einen Lebensweg 2018 – 2030 in Abhängigkeit von der Lebensfahrleistung

Abbildung 10



Anmerkungen: Pkw mit heutigem Entwicklungsstand. Strommix auf Basis von (Pehnt et al. 2018); Verbrauch ICEV Diesel: 4,7l/100 km, ICEV Benzin: 5,9 l/100km, CNG: 4,6 kg/100km, BEV: 16 kWh/100 km (ohne Ladeverluste), PtG: 4,6 kg/100km. Berechnung durch ifeu

wende im betrachteten Zeitraum 2018 bis 2030 ist dabei bereits berücksichtigt. Für das Beispielfahrzeug beträgt der Klimavorteil nach 150.000 km gegenüber dem Benzin 24 Prozent und gegenüber dem Diesel 16 Prozent.

Die Klimabilanz des bereits am Markt etablierten CNG-Pkw ist im Betrieb mit konventionellem CNG näherungsweise vergleichbar mit einem Diesel-ICEV. Der zusätzliche Aufwand der Herstellung eines CNG-Tanks ist vergleichsweise gering und der Betrieb im Fallbeispiel mit einer nur geringfügig niedrigeren Klimawirkung verbunden wie der eines Diesels. Daraus ergibt sich für eine Lebensfahrleistung von 150.000 km ein Vorteil von 4 Prozent gegenüber dem Diesel. Das BEV hätte bei gleicher Laufleistung gegenüber dem Diesel einen Vorteil von 16 Prozent, gegenüber dem Erdgasfahrzeug läge der Vorteil entsprechend bei knapp 13 Prozent.

Eine bessere Bilanz für den CNG-Pkw würde sich ergeben, wenn man den Biomethananteil in der Bilanzierung berücksichtigt, der dem Verkehr per Zertifikat zugeordnet wird (siehe Kapitel 3.2). Dann wäre dieser Ansatz jedoch auch auf die zu vergleichenden Systeme anzuwenden. Im Falle des BEV wäre dann gegebenenfalls auch zu berücksichtigen, dass Nutzer und Nutzerinnen von BEV dazu tendieren, grünen Strom zu beziehen oder sogar eigene Fotovoltaikanlagen zum Laden einzusetzen. Auch die Gesamtpotenziale der entsprechenden Rohstoffe müssten dann in Betracht gezogen werden. Eine solche erweiterte Betrachtung für alle betrachteten Energieträger sprengt jedoch den Rahmen der Studie.

Eine weitere Dekarbonisierungsoption für CNG-Pkw bildet die Nutzung synthetischen strombasierten Gases, das sogenannte Power-to-Gas (PtG). Wird das PtG jedoch mit dem gleichen für Deutschland im Zeitraum 2018 bis 2030 erwarteten mittleren Strommix produziert, der auch für das BEV angesetzt wurde, dann ergibt sich im Fallbeispiel nach 150.000 km eine gut 2,5-fach höhere Klimawirkung als bei Nutzung von konventionellem Diesel oder Erdgas. Gegenüber der direkten Nutzung des Stroms in einem BEV liegt die Klimawirkung nach 150.000 km knapp drei Mal höher. Die Nutzung von synthetischem Gas ist damit aus Klimasicht nur bei Erschließung zusätzlicher Potenziale erneuerbarer Stromerzeugung sinnvoll. Solange Strom aus Wind und Sonne jedoch ein begrenztes Gut darstellt und universell nutzbar ist, ist die direkte Nutzung in BEV um ein Vielfaches effizienter.

5.2 Ergebnisse für Brennstoffzelle und synthetischen Kraftstoff

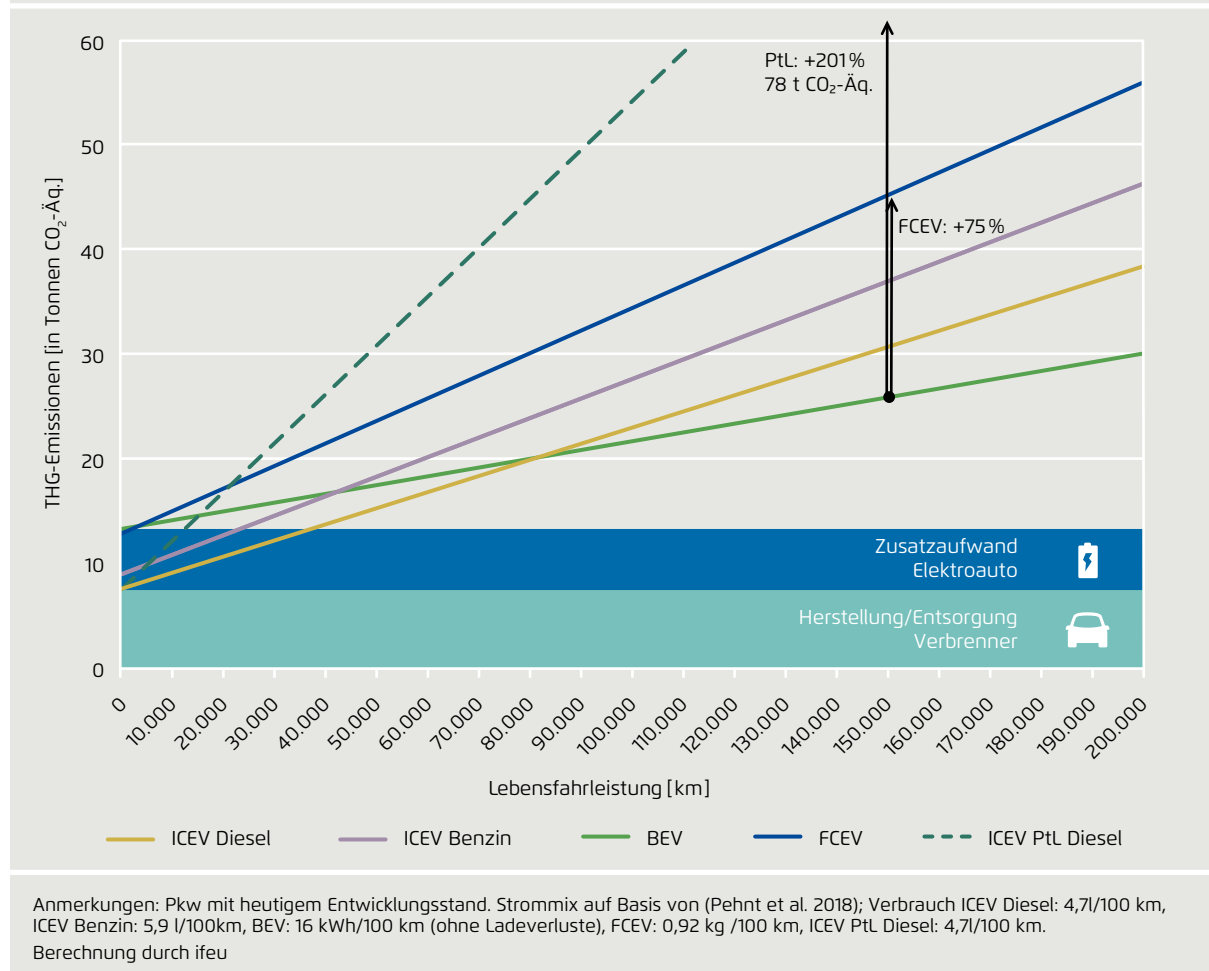
Abbildung 11 zeigt die bereits bekannten Ergebnisse (Agora Verkehrswende 2019 b) für das mit konventionellem Benzin und Diesel betriebene ICEV sowie das BEV und stellt diese den neuen Ergebnissen für das FCEV sowie einem mit PtL betriebenen ICEV gegenüber. Das Fallbeispiel des FCEV führt zu ähnlich hohen Klimawirkungen in der Fahrzeugherstellung wie das BEV mit 35 kWh Batteriekapazität. Durch die hohen Konversionsverluste in der Elektrolyse und in der Brennstoffzelle ist die nutzungsbedingte Klimawirkung bei Einsatz von mit Strommix produziertem Wasserstoff jedoch deutlich schlechter als beim BEV und sogar höher als beim ICEV. Dabei wurde die gleiche Entwicklung des Strommix auch für die elektrolytische Herstellung des Wasserstoffs angenommen. Die Klimawirkung liegt dann nach 150.000 km 47 Prozent über der des Diesel-ICEV. Gegenüber dem bilanzierten BEV in gemischter Nutzung ist die Klimawirkung bei 150.000 km Lebensfahrleistung sogar 75 Prozent höher.

Die Nutzung synthetischen Diesels im ICEV hat gegenüber dem BEV und FCEV den Vorteil, dass kein zusätzlicher Herstellungsaufwand für das Fahrzeug entsteht. Durch die besonders hohen Konversionsverluste – auch gegenüber der Wasserstoffproduktion – verursacht die Nutzungsphase jedoch deutlich höhere Treibhausgasemissionen als die Nutzung konventioneller Kraftstoffe im ICEV bzw. die direkte Nutzung von Strom im BEV. Wird das PtL mit dem für Deutschland im Zeitraum 2018 bis 2030 erwarteten mittleren Strommix produziert, dann ergibt im Fallbeispiel nach 150.000 km die Nutzung des PtL eine gut 2,5-fach höhere Klimawirkung als die Nutzung konventionellen Diesels. Gegenüber der direkten Nutzung dieses Stroms in einem BEV liegt die Klimawirkung nach 150.000 km etwa drei Mal so hoch.

Gegenüber dem BEV hat die Nutzung von synthetischem Kraftstoff und von Wasserstoff jedoch den Vorteil hoher Energiedichten und damit hoher Reichweiten bei sehr kurzen Tankzeiten. Beide Alternativen eignen sich daher vor allem für den Fernverkehr und werden auch überwiegend in diesem Zusammenhang diskutiert. Analog zu Agora Verkehrswende (2019 b) wird daher hier die Sensitivität einer ausschließlichen Nutzung der berücksichtigten Antriebskonzepte auf Autobahnen betrachtet.

Treibhausgasemissionen des Beispielfahrzeugs der Kompaktklasse
(ICEV (konventionell und PtL), BEV, FCEV) in gemischter Nutzung über einen
Lebensweg 2018 – 2030 in Abhängigkeit von der Lebensfahrleistung

Abbildung 11



Während hier die übrigen Fahrzeugkonzepte herstellungsseitig unverändert bleiben,⁴¹ wird für das BEV eine

41 Fahrzeuge im Fernverkehr und insbesondere FCEV liegen tendenziell in größeren Segmenten. Hier wurde für den Fernverkehr dennoch der Fahrzeugrumpf der Kompaktklasse übernommen. Die Unterschiede für den Klimarucksack der Fahrzeugherstellung ergeben sich aus Komponenten, die in dem einen Fahrzeugkonzept enthalten sind, in dem anderen aber nicht (wie z. B. Li-Ionen-Akku oder Wasserstofftank). Die Betrachtung eines Fahrzeugs z. B. der Oberklasse würde damit jenseits der Auslegung von Tank, Brennstoffzelle und Batterie alle Antriebskonzepte gleichermaßen betreffen, das heißt für alle Antriebskonzepte wären gleichermaßen steigende Aufwände aufgrund der verwendeten Materialien

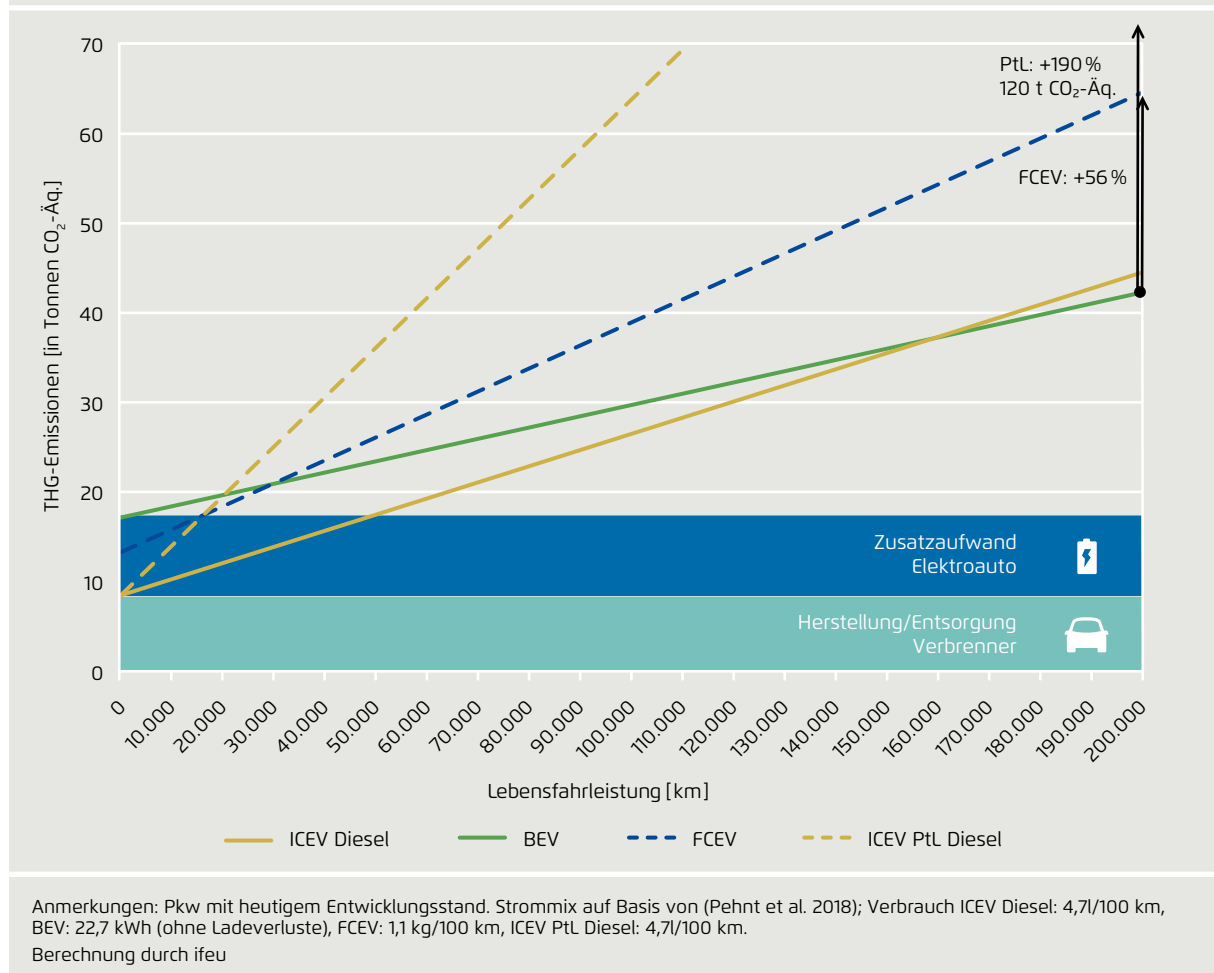
Batteriekapazität von 60 kWh angenommen. Prinzipiell ist im Fernverkehr mit höheren Fahrleistungen zu rechnen, daher erfolgt die Quantifizierung des Fallbeispiels für eine Lebensfahrleistung von 200.000 km.

In diesem Fallbeispiel liegt die Klimawirkung der Herstellung des BEV mit 60 kWh Batteriekapazität deutlich über der des betrachteten FCEV. Gegenüber dem konventionellen Diesel-ICEV und CNG-Pkw hätte das FCEV bei Einsatz von mit Strommix produziertem Wasserstoff dann nach 200.000 km ebenfalls eine etwa

im Fahrzeugrumpf (wie z. B. Stahl, Aluminium, Kunststoffe) zu verzeichnen.

Treibhausgasemissionen des Beispielfahrzeugs der Kompaktklasse
(ICEV (konventionell und PtL), BEV, FCEV) in Autobahnnutzung über einen
Lebensweg 2018 – 2030 in Abhängigkeit von der Lebensfahrleistung

Abbildung 12



45 Prozent höhere Klimawirkung. Der Unterschied zum BEV schrumpft aber, da hier durch die größere Batterie deutlich höhere Treibhausgasemissionen in der BEV-Herstellung entstehen und auch der Energieverbrauch des BEV auf Autobahnen deutlich ansteigt. Bei 200.000 km Lebensfahrleistung auf Autobahnen läge die Klimawirkung des betrachteten FCEV allerdings immer noch 56 Prozent über der des BEV. Bei noch höheren Batteriekapazitäten im Bereich von 90–100 kWh – wie sie z. B. derzeit im Tesla Model X, Porsche Taycan oder Jaguar I-Pace verbaut sind – würde der Abstand weiter schrumpfen. Auch dann wäre bei Nutzung des Strommix in Deutschland jedoch kaum mit einer Ergebnisumkehr im Fallbeispiel zu rechnen.

Die Ergebnisse zeigen damit deutlich die zentrale Bedeutung der Strombereitstellung für die Menge an Klimagasemissionen von Fahrzeugen, die strombasierte Energieträger nutzen. Im Vergleich der strombasierten Energieträger untereinander bestimmt bei Nutzung des gleichen Strommix vor allem die Konversionseffizienz die Bilanz. Hier hat das BEV klare Vorteile durch die direkte Nutzung des Stroms. Durch den ebenfalls relevanten Herstellungsaufwand für das FCEV und die Verluste im Prozess der Wasserstoffherstellung und in der Brennstoffzelle hat die Nutzung von Wasserstoff in den hier betrachteten Fallbeispielen eine schlechtere Klimabilanz als das betrachtete BEV. Dies gilt auch für die hier berücksichtigte Sensitivität für den Fernverkehr.

Auch bei größeren Batteriekapazitäten bleibt die Klimabilanz des BEV tendenziell günstiger, wenn im Vergleich der beiden Antriebsarten jeweils derselbe Strommix für das Laden des BEV und für die Wasserstoff-Elektrolyse zugrunde gelegt wird.

Besonders schlecht stellt sich die Klimabilanz von ICEV bei Nutzung synthetischer Kraftstoffe dar, die mit Strommix hergestellt wurden. Durch die – auch gegenüber der Wasserstoffherstellung – deutlich höheren Konversionsverluste liegt die Klimawirkung in allen betrachteten Fällen um ein Vielfaches über der direkten Stromnutzung in BEV. So kann die Nutzung synthetischer Kraftstoffe aus Klimasicht nur dann sinnvoll sein, wenn sie durch Erschließung zusätzlicher Potenziale von Wind- und Solarenergie vollständig klimaneutral hergestellt werden. Solange Strom aus Wind und Sonne jedoch ein begrenztes Gut darstellt und universell nutzbar ist, ist die direkte Nutzung in BEV um ein Vielfaches klimaeffizienter.

Zukünftig sind herstellungsseitig sowohl beim FCEV als auch beim BEV weitere Verbesserungen zu erwarten. Auch die Strombereitstellung wird sich weiter dekarbonisieren und damit alle hier betrachteten strombasierten Energieträger verbessern. Zusätzlich können die Prozesse für die Wasserstoff-Elektrolyse sowie für die PtG- bzw. PtL-Herstellung effizienter werden. Damit rückt dann jedoch bei weiterhin begrenzter Erzeugung von Strom aus erneuerbaren Energiequellen die Energieeffizienz weiter in den Vordergrund. Die grundsätzlichen Ergebnistendenzen bleiben damit erhalten.

06 | Literaturverzeichnis

Literaturangaben ewertung der zentralen Ergebnisse aus Sicht von Agora Verkehrswende

Agora Verkehrswende (2017): *Mit der Verkehrswende die Mobilität von morgen sichern. 12 Thesen zur Verkehrswende.* https://www.agora-verkehrswende.de/fileadmin/Projekte/2017/12_Thesen/Agora-Verkehrswende-12-Thesen_WEB.pdf.

Agora Verkehrswende und Agora Energiewende (2018): *Die zukünftigen Kosten strombasierter synthetischer Brennstoffe: Schlussfolgerungen aus Sicht von Agora Verkehrswende und Agora Energiewende.* In: Agora Verkehrswende, Agora Energiewende und Frontier Economics (2018): *Die zukünftigen Kosten strombasierter synthetischer Brennstoffe.* https://www.agora-verkehrswende.de/fileadmin/Projekte/2017/Die_Kosten_synthetischer_Brenn-_und_Kraftstoffe_bis_2050/Agora_SynCost-Studie_WEB.pdf.

Agora Verkehrswende (2019a): *Auf der Zielgeraden. Die deutschen Automobilhersteller im Kontext der europäischen CO₂-Vorgaben für 2021.* https://www.agora-verkehrswende.de/fileadmin/Projekte/2019/Peter-Mock_Zielgerade/Agora-Verkehrswende_Kurzstudie_Auf-der-Zielgeraden_02.pdf.

Agora Verkehrswende (2019b): *Klimabilanz von Elektroautos. Einflussfaktoren und Verbesserungspotenzial.* https://www.agora-verkehrswende.de/fileadmin/Projekte/2018/Klimabilanz_von_Elektroautos/Agora-Verkehrswende_22_Klimabilanz-von-Elektroautos_WEB.pdf.

Agora Verkehrswende, Agora Energiewende und Frontier Economics (2018): *Die zukünftigen Kosten strombasierter synthetischer Brennstoffe.* https://www.agora-verkehrswende.de/fileadmin/Projekte/2017/Die_Kosten_synthetischer_Brenn-_und_Kraftstoffe_bis_2050/Agora_SynCost-Studie_WEB.pdf.

Fraunhofer ISE (2019): *Erläuterungen zur Studie „Treibhausgas-Emissionen für Batterie- und Brennstoffzellenfahrzeuge mit Reichweiten über 300 km“.* https://www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/de/documents/news/2019/Erlaeuterungen_Studie-THG-Emissionen_ISE.pdf.

Frischknecht, R.; Messmer, A. & Stolz, P. (2018): *Aktualisierung Umweltaspekte von Elektroautos – Ein Argumentarium.* https://www.bafu.admin.ch/dam/bafu/de/dokumente/luft/externe-studien-berichte/umweltaspekte_vonelektroautos.pdf.download.pdf/umweltaspekte_vonelektroautos.pdf.

Gerbert, P.; Herhold, P.; Burchardt, J.; Schönberger, S.; Rechenmacher, F.; Kirchner, A.; Kemmler, A. & Wünsch, M. (2018): *Klimapfade für Deutschland.* <https://bdi.eu/publikation/news/klimapfade-fuer-deutschland/>.
Letzter Zugriff am: 12.11.2019.

Hoekstra, A. (2019): *Fraunhofer ISE was wrong: hydrogen cars are not cleaner than battery-driven electric vehicles and diesel cars are not even close.* <https://innovationorigins.com/fraunhofer-ise-was-wrong-hydrogen-cars-are-not-cleaner-than-battery-driven-electric-vehicles-and-diesel-cars-are-not-even-close/>.
Letzter Zugriff am: 12.11.2019.

Emilsson E. & Dahlöf L. (2019): *Lithium-Ion Vehicle Battery Production. Status 2019 on Energy Use, CO₂ Emissions, Use of Metals, Products Environmental Footprint, and Recycling.* IVL Swedish Environmental Research Institute in cooperation with the Swedish Energy Agency, Stockholm, Sweden. <https://www.ivl.se/download/18.14d7b12e16e3c5c36271070/1574923989017/C444.pdf>.

Jungmeier, G.; Canella, L.; Pucker-Singer, J. & Beermann, M. (2019): *Geschätzte Treibhausgasemissionen und Primärenergieverbrauch in der Lebenszyklusanalyse von Pkw-basierten Verkehrssystemen.* <https://www.adac.de/-/media/pdf/tet/lca-tool--joanneum-research.pdf?la=de-de&hash=F06DD4E9DF0845BC95BA22BCA76C4206>.
Letzter Zugriff am: 12.11.2019.

Kasten, P., Heinemann, C., Seebach, D., Sutter, J. (2019): *Kein Selbstläufer: Klimaschutz und Nachhaltigkeit durch PtX. Diskussion der Anforderungen und erste Ansätze für Nachweiskriterien für eine klimafreundliche und nachhaltige Produktion von PtX-Stoffen.* Impulspapier im Auftrag des BUND im Rahmen des Kopernikus-Vorhabens „P2X“, Berlin, 2019. <https://www.oeko.de/fileadmin/oekodoc/Impulspapier-soz-oek-Kriterien-e-fuels.pdf>.

Kasten, P., Bracker, J., Timpe, C., Hacker, F. (2017): *Klimavorteil Elektromobilität? Handlungsempfehlungen zur Gestaltung des Beitrages der Elektromobilität zum Klimaschutz*. Policy Paper. Berlin, 2017. https://www.oeko.de/fileadmin/oekodoc/Klimavorteil_Elektromobilitaet_Diskussionspapier_2017.pdf.

Regett, A. Wagner, U. Mauch, W., Bangoj, J. (2019): *Environmental Impact of Electric Vehicles: Potential of the Circular Economy?* In: Johannes Liebl [Hrsg.] (2019) *Der Antrieb von morgen 2019. Diversifizierung konsequent vorantreiben*, 13. Internationale MTZ-Fachtagung Zukunftsantriebe.

Sternberg, A.; Hank, C. & Hebling, C. (2019): *Treibhausgas-Emissionen für Batterie- und Brennstoffzellenfahrzeuge mit Reichweiten über 300 km*. https://www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/de/documents/news/2019/ISE_Ergebnisse_Studie_Treibhausgasemissionen.pdf.

Transport & Environment (2019): *Electric surge: Car-makers' electric car plans across Europe 2019–2025*. <https://www.transportenvironment.org/publications/electric-surge-car-makers-electric-car-plans-across-europe-2019-2025>.
Letzter Zugriff am: 12.11.2019.

Wietschel, M.; Moll, C.; Oberle, S.; Lux, B.; Timmerberg, S.; Neuling, U.; Kaltschmitt, M. & Ashley-Belbin, N. (2019): *Klimabilanz, Kosten und Potenziale verschiedener Kraftstoffarten und Antriebssysteme für Pkw und Lkw – Endbericht*. <https://www.isi.fraunhofer.de/content/dam/isi/dokumente/cce/2019/klimabilanz-kosten-potenziale-antriebe-pkw-lkw.pdf>.

Literaturangaben

37. BImSchV (2017): *Siebenunddreißigste Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (Verordnung zur Anrechnung von strombasierten Kraftstoffen und mitverarbeiteten biogenen Ölen auf die Treibhausgasquote) (37. BImSchV)*. https://www.gesetze-im-internet.de/bimschv_37/37_BImSchV.pdf.

38. BImSchV (2019): *Achtunddreißigste Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (Verordnung zur Festlegung weiterer Bestimmungen zur Treibhausgasminderung bei Kraftstoffen – 38.BImSchV)*. https://www.gesetze-im-internet.de/bimschv_38_2017/38_BImSchV.pdf.

ADAC (2018): *Elektroautos im Test: So hoch ist der Stromverbrauch (vom 12.10.2018)*. Allgemeiner Deutscher Automobil-Club e.V. (ADAC), München.

ADAC (2019 a): *ADAC Ecotest*. <https://www.adac.de/infotestrat/tests/eco-test/default.aspx?ComponentId=29755&SourcePageId=8749&quer=ecotest>. Letzter Zugriff am: 15.10.2019.

ADAC (2019 b): *Test Toyota Mirai: Wasserstoff an Bord*. <https://www.adac.de/der-adac/motorwelt/reportagen-berichte/auto-innovation/brennstoffzellenauto-toyota-mirai/>. Letzter Zugriff am: 04.11.2019.

AGEB (2019): *Energieverbrauch in Deutschland im Jahr 2018*. https://ag-energiebilanzen.de/index.php?article_id=29&fileName=ageb_jahresbericht2018_20190326_dt.pdf.

Agora Verkehrswende (2018): *Klimaschutz im Verkehr: Maßnahmen zur Erreichung des Sektorziels 2030*. https://www.agora-verkehrswende.de/fileadmin/Projekte/2017/Klimaschutzszenarien/Agora_Verkehrswende_Klimaschutz_im_Verkehr_Massnahmen_zur_Erreichung_des_Sektorziels_2030.pdf.

Agora Verkehrswende (2019 b): *Klimabilanz von Elektroautos. Einflussfaktoren und Verbesserungspotenzial*. https://www.agora-verkehrswende.de/fileadmin/Projekte/2018/Klimabilanz_von_Elektroautos/Agora-Verkehrswende_22_Klimabilanz-von-Elektroautos_WEB.pdf.

Ausfelder, F. & Dura, H. E. (2019): 1. Roadmap des Kopernikus-Projektes „Power-to-X“: Flexible Nutzung erneuerbarer Ressourcen (P2X) – Optionen für ein nachhaltiges Energiesystem mit Power-to-X Technologien – Herausforderungen – Potenziale – Methoden – Auswirkungen. https://dechema.de/dechema_media/Downloads/Positionspapiere/2018_Power_to_X-p-20003687.pdf.

Bauer, C.; Hofer, J.; Althaus, H.-J.; Del Duce, A. & Simons, A. (2015): The environmental performance of current and future passenger vehicles: Life Cycle Assessment based on a novel scenario analysis framework. In: *Applied Energy*. Elsevier Ltd. Vol. 157, S. 871 – 883.

BAFA (2019): Elektromobilität (Umweltbonus) – Zwischenbilanz zum Antragsstand vom 31. Oktober 2019. https://www.bafa.de/SharedDocs/Downloads/DE/Energie/emob_zwischenbilanz.pdf?__blob=publicationFile&v=49. Letzter Zugriff am: 04.11.2019.

Basshuysen, R. van (2015): Erdgas und erneuerbares Methan für den Fahrzeugantrieb – Wege zur klimaneutralen Mobilität. Springer Vieweg Wiesbaden.

BDEW (2017): Sauber voran: Gas für die Verkehrswende. <https://www.bdew.de/energie/sauber-voran-gas-fuer-die-verkehrswende/>. Letzter Zugriff am: 12.11.2019.

BImSchG (2019): Gesetz zum Schutz vor schädlichen Umwelteinwirkungen durch Luftverunreinigungen, Geräusche, Erschütterungen und ähnliche Vorgänge (Bundes-Immissionsschutzgesetz – BImSchG). <https://www.gesetze-im-internet.de/bimsg/BImSchG.pdf>.

Biokraft-NachV (2009): Verordnung über Anforderungen an eine nachhaltige Herstellung von Biokraftstoffen (Biokraftstoff-Nachhaltigkeitsverordnung – Biokraft-NachV). <https://www.gesetze-im-internet.de/biokraft-nachv/Biokraft-NachV.pdf>.

BLE (2019): Evaluations- und Erfahrungsbericht für das Jahr 2018. https://www.ble.de/SharedDocs/Downloads/DE/Klima-Energie/Nachhaltige-Biomasseherstellung/Evaluationsbericht_2018.pdf?__blob=publicationFile&v=2. Letzter Zugriff am: 12.11.2019.

BMW (2019): Zahlen und Fakten Energiedaten – Nationale und Internationale Entwicklung. https://www.bmw.de/Redaktion/DE/Binaer/Energiedaten/energiedaten-gesamt-xls.xlsx?__blob=publicationFile&v=117. Letzter Zugriff am: 12.11.2019.

BMW (n. d.): Langfrist- und Klimaszenarien. <https://www.bmw.de/Redaktion/DE/Artikel/Energie/langfrist-und-klimaszenarien.html>. Letzter Zugriff am: 12.11.2019.

Boureima, F.; Messagie, M.; Sergeant, N.; Matheys, J.; Van Mierlo, J.; De Vos, M.; De Caemel, B.; Turcksin, L. & Macharis, C. (2012): Environmental assessment of different vehicle technologies and fuels. In: *WIT Transactions on the Built Environment*. Vol. 128, S. 15 – 26.

Camia, A.; Robert, N.; Jonsson, R.; Pilli, R.; García-Condado, S.; López-Lozano, R.; van der Velde, M.; Ronzon, T.; Gurria, P.; M'Barek, R.; Tamosiunas, S.; Fiore, G.; Araujo, R.; Hoepffner, N.; Marelli, L. & Giuntoli, J. (2018): Biomass production, supply, uses and flows in the European Union. First results from an integrated assessment. https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/bitstream/JRC109869/jrc109869_biomass_report_final2pdf2.pdf.

dena (n. d.): Willkommen beim Biogasregister Deutschland. <https://www.biogasregister.de/startseite.html>. Letzter Zugriff am: 12.11.2019.

DWV (n. d.): Fragen und Antworten. <https://www.dwv-info.de/wissen-und-unwissen/fragen-und-antworten/>. Letzter Zugriff am: 12.11.2019.

EEG (2019): Gesetz für den Ausbau erneuerbarer Energien (Erneuerbare-Energien-Gesetz – EEG 2017). https://www.gesetze-im-internet.de/eeg_2014/EEG_2017.pdf.

Elgowainy, A.; Han, J.; Ward, J.; Joseck, F.; Gohlke, D.; Lindauer, A.; Ramsden, T.; Bidy, M.; Alexander, M.; Barnhart, S.; Sutherland, I.; Verduzco, L. & Wallington, T. J. (2016): Cradle-to-Grave Lifecycle Analysis of U.S. Light-Duty Vehicle-Fuel Pathways: A Greenhouse Gas Emissions and Economic Assessment of Current (2015) and Future (2025–2030) Technologies. In: *Argonne National Laboratory*.

Evangelisti, S.; Tagliaferri, C.; Brett, D. J. L. & Lettieri, P. (2017): Life cycle assessment of a polymer electrolyte membrane fuel cell system for passenger vehicles. In: *Journal of Cleaner Production*. Vol. 142, S. 4339 – 4355.

Fehrenbach, H.; Köppen, S.; Markwardt, S. & Vogt, R. (2016): Aktualisierung der Eingangsdaten und Emissionsbilanzen wesentlicher biogener Energienutzungspfade (BioEm). https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/378/publikationen/texte_09_2016_aktualisierung_der_eingangsdaten_und_emissionsbilanzen_wesentlicher_biogener_energienutzungspfade_1.pdf.

Fehrenbach, H.; Giegrich, J.; Köppen, S.; Wern, B.; Pertagnol, J.; Baur, F.; Hünecke, K.; Dehoust, G.; Bulach, W. & Wiegmann, K. (2019): BioRest: Verfügbarkeit und Nutzungsoptionen biogener Abfall- und Reststoffe im Energiesystem (Strom-, Wärme- und Verkehrssektor) – Abschlussbericht. https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2019-09-24_texte_115-2019_biorest.pdf.

Frischknecht, R. (2013): Memo: Regeln für Ökobilanzdaten im Baubereich gemäss der KBOB-Liste. https://www.eco-bau.ch/resources/uploads/Oekobilanzdaten/Plattform_OeDB_Memo_Produktspezifische%20Regeln_v2_01.pdf.

gibgas (n. d.): Startseite. <https://www.gibgas.de/>. Letzter Zugriff am: 20.11.2019.

Günther, J.; Lehmann, H.; Lorenz, U. & Purr, K. (2019): Den Weg zu einem treibhausgasneutralen Deutschland ressourcenschonend gestalten. https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/376/publikationen/190215_uba_fachbrosch_rtd_bf.pdf.

Hausmann, P.; Sussmann, R. & Smale, D. (2016): Contribution of oil and natural gas production to renewed increase in atmospheric methane (2007–2014): top-down estimate from ethane and methane column observations. In: *Atmospheric Chemistry and Physics*, 16, S. 3227 – 3244. <https://www.atmos-chem-phys.net/16/3227/2016/acp-16-3227-2016.pdf>.

Helms, H. & Kräck, J. (2016): Energy savings by lightweighting: 2016 Update. Im Auftrag von International

Aluminium Institute supported by European Aluminium. ifeu – Institut für Energie und Umweltforschung, Heidelberg. <https://www.european-aluminium.eu/media/1878/ifeu-energy-savings-by-light-weighting-2016-update-full-report.pdf>

Hollweck, B.; Moullion, M.; Christ, M.; Kolls, G. & Wind, J. (2018): Energy Analysis of Fuel Cell Electric Vehicles (FCEVs) under European Weather Conditions and Various Driving Behaviors. Paper presented at the 6th EURO-PEAN PEFC & ELECTROLYZER Forum (EFCF2017), July 4 – 7, 2017 held in Lucerne, Switzerland. Organized by the European Fuel Cells Forum – www.efcf.com

IEA (2018): World Energy Outlook 2018. <https://www.iea.org/weo2018/>. Letzter Zugriff am: 12.11.2019.

ifeu (2016): Aktualisierung „Daten- und Rechenmodell: Energieverbrauch und Schadstoffemissionen des motorisierten Verkehrs in Deutschland 1960–2035“ (TREMODO) für die Emissionsberichterstattung 2016 (Berichtsperiode 1990–2014). https://www.ifeu.de/wp-content/uploads/Endbericht_TREMODO_2016_160701.pdf.

IRENA (2016): Innovation Outlook – Advanced Liquid Biofuels. https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2016/IRENA_Innovation_Outlook_Advanced_Liquid_Biofuels_2016.pdf.

Itten, R.; Frischknecht, R. & Stucki, M. (2014): Life Cycle Inventories of Electricity Mixes and Grid – Version 1.3, treeze Ltd., fair life cycle thinking, Uster.

Kasten, P. & Heinemann, C. (2019): Kein Selbstläufer: Klimaschutz und Nachhaltigkeit durch PtX – Diskussion der Anforderungen und erste Ansätze für Nachweiskriterien für eine klimafreundliche und nachhaltige Produktion von PtX-Stoffen. <https://www.oeko.de/fileadmin/oekodoc/Impulspapier-soz-oek-Kriterien-e-fuels.pdf>.

KBA (2019): Bestand an Pkw am 1. Januar 2019 nach ausgewählten Kraftstoffarten. https://www.kba.de/DE/Statistik/Fahrzeuge/Bestand/Umwelt/2019_b_umwelt_dusl.html?nn=663524. Letzter Zugriff am: 04.11.2019.

Kräck, J.; Jöhrens, J. & Helms, H. (2015): Ermittlung des realitätsnahen und nutzerspezifischen Energieverbrauchs aktueller Elektrofahrzeuge auf Basis individueller Fahrprofile und standardisierter Messdaten. In: *Elektrik/Elektronik in Hybrid- und Elektrofahrzeugen und elektrisches Energiemanagement VI*. Haus der Technik Fachbuch (138). expert-Verlag, Renningen. S. 177 – 190.

Lozanovski, A.; Baumann, M.; Vega, L.; Blejman, G. & Ruiz, P. (2015): HyTEC Hydrogen Transport in European Cities – Final Life Cycle Assessment Report. No.6, S. 2014.

Miotti, M.; Hofer, J. & Bauer, C. (2015): Integrated environmental and economic assessment of current and future fuel cell vehicles. In: *International Journal of Life Cycle Assessment. The International Journal of Life Cycle Assessment*. Vol. 22, No. 1, S. 94 – 110.

NPM AG1 (2019): Zwischenbericht 03/2019 – Wege zur Erreichung der Klimaziele 2030 im Verkehrssektor. Arbeitsgruppe 1. Klimaschutz im Verkehr. https://www.plattform-zukunft-mobilitaet.de/wp-content/uploads/2019/03/Zwischenbericht-03_2019-der-AG1-Klimaschutz-der-NPM-Wege-zur-Erreichung-der-Klimaziele-2030-im-Verkehrssektor.pdf.

Pehnt, D. M.; Mellwig, P.; Blömer, S.; Hertle, H.; Nast, M.; Oehsen, A. von; Lempik, J.; Langreder, N.; Thamling, N.; Hermelink, D. A.; Offermann, M.; Pannier, P. & Müller, M. (2018): Untersuchung zu Primärenergiefaktoren. Endbericht im Auftrag des BMWi. Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg (ifeu); Prognos AG; Ecofys; dena – Deutsche Energie-Agentur GmbH, Heidelberg, Berlin.

Pfennig, M.; Gerhardt, N.; Pape, C. & Böttger, D. (2017): Mittel- und langfristige Potenziale von PtL- und H₂-Importen aus internationalen EE-Vorzugsregionen – Teilbericht. http://www.energieversorgung-elektromobilitaet.de/includes/reports/Teilbericht_Potenziale_PtL_H2_Importe_FraunhoferIWES.pdf.

Pfluger, B.; Tersteegen, B. & Franke, B. (2018): Langfristszenarien für die Transformation des Energiesystems in Deutschland. Modul U. a.: Ökologische Evaluierung der Szenarien Referenzszenario, Basisszenario, Szenario Geringerer Ausbau der Übertragungsnetze, Szenario Alternative regionale EE-Verteilung und Restriktions-

armes Szenario. https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Downloads/B/berichtsmodul-u-a-oekologische-evaluierung-der-szenarien.pdf?__blob=publicationFile&v=4. Letzter Zugriff am: 12.11.2019.

Pötscher, F.; Winter, R.; Pölz, W.; Lichtblau, G.; Schreiber, H. & Kutschera, U. (2014): Ökobilanz alternativer Antriebe – Elektrofahrzeuge im Vergleich.

Repenning, J.; Emele, L.; Blanck, R.; Dehoust, G.; Förster, H.; Greiner, B.; Harthan, R.; Henneberg, K.; Hermann, H.; Jörß, W.; Ludig, S.; Loreck, C.; Scheffler, M.; Schumacher, K.; Wiegmann, K.; Zell-Ziegler, C.; Braungardt, S.; Eichhammer, W.; Elsland, R.; Fleiter, T.; Hartwig, J.; Kockat, J.; Pfluger, B.; Schade, W.; Schlomann, B.; Sensfuß, F. & Ziesing, H.-J. (2015): Klimaschutzszenario 2050 – Zusammenfassung des 2. Endberichts. <https://www.oeko.de/oekodoc/2441/2015-598-de.pdf>.

Richtlinie 2009/28/EG (2009): Richtlinie 2009/28/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 23. April 2009 zur Förderung der Nutzung von Energie aus erneuerbaren Quellen und zur Änderung und anschließenden Aufhebung der Richtlinien 2001/77/EG und 2003/30/EG. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:32009L0028>. Letzter Zugriff am: 12.11.2019.

Richtlinie 2014/94/EU (2014): Richtlinie 2014/94/EU des Europäischen Parlaments und des Rates vom 22. Oktober 2014 über den Aufbau der Infrastruktur für alternative Kraftstoffe. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:32014L0094>. Letzter Zugriff am: 12.11.2019.

Richtlinie (EU) 2015/652 (2015): Richtlinie (EU) 2015/652 des Rates vom 20. April 2015 zur Festlegung von Berechnungsverfahren und Berichterstattungspflichten gemäß der Richtlinie 98/70/EG des Europäischen Parlaments und des Rates über die Qualität von Otto- und Dieselmotoren. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:32015L0652&from=DE>. Letzter Zugriff am: 12.11.2019.

Richtlinie (EU) 2018/2001 (2018): *Richtlinie (EU) 2018/2001 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 11. Dezember 2018 zur Förderung der Nutzung von Energie aus erneuerbaren Quellen (Neufassung).* <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:32018L2001&from=DE>. Letzter Zugriff am: 12.11.2019.

Schmied, M. & Knörr, W. (2013): *Berechnung von Treibhausgasemissionen in Spedition und Logistik gemäß DIN EN 16258 – Begriffe, Methoden, Beispiele.* [https://www.dslv.org/dslv/web.nsf/gfx/8F102DF8C3E4A2F141257BB7007779CB/\\$file/DSLIV-Leitfaden%20Berechnung%20von%20THG-Emissionen%20Stand%2003-2013.pdf](https://www.dslv.org/dslv/web.nsf/gfx/8F102DF8C3E4A2F141257BB7007779CB/$file/DSLIV-Leitfaden%20Berechnung%20von%20THG-Emissionen%20Stand%2003-2013.pdf).

Schwarzer, C. M. (2018): *Unterwegs mit Wasserstoff – Alltagstest Toyota Mirai.* <https://www.heise.de/autos/artikel/Unterwegs-mit-Wasserstoff-Alltagstest-Toyota-Mirai-4094143.html?seite=3>. Letzter Zugriff am: 04.11.2019.

Siegemund, S. & Schmidt, P. (2017): *«E-Fuels» Study – The potential of electricity-based fuels for low-emission transport in the EU – An expertise by LBST and dena.* 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.

Simons, A. & Bauer, C. (2015): *A life-cycle perspective on automotive fuel cells.* In: *Applied Energy*. Elsevier Ltd. Vol. 157, S. 884 – 896.

Sternberg, A.; Hank, C. & Hebling, C. (2019): *Treibhausgas-Emissionen für Batterie- und Brennstoffzellenfahrzeuge mit Reichweiten über 300 km.* https://www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/de/documents/news/2019/ISE_Ergebnisse_Studie_Treibhausgasemissionen.pdf.

Thrän, D.; Lauer, M.; Dotzauer, M.; Kalcher, J.; Oehmichen, K.; Majer, S.; Millinger, M. & Jordan, M. (2019): *Technoökonomische Analyse und Transformationspfade des energetischen Biomassepotentials (TATBIO) – Endbericht.* <https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Publikationen/Studien/technoökonomische-analyse-und-transformationspfade-des-energetischen-biomassepotentials.html>. Letzter Zugriff am: 12.11.2019.

Viehmann, C.; Westerkamp, T.; Schwenker, A.; Schenker, M.; Thrän, D.; Lenz, V. & Ebert, M. (2012): *Ermittlung des Verbrauchs biogener Festbrennstoffe im Sektor Gewerbe, Handel, Dienstleistungen (GHD-Sektor): Endbericht. (DBFZ-Report, 10).* Leipzig: DBFZ. XV, 163, XVI–XXXII S. <https://www.dbfz.de/pressemediathek/publikationsreihen-des-dbfz/dbfz-reports/dbfz-report-nr-10/>. Letzter Zugriff am: 12.11.2019.

Wernet, G.; Bauer, C.; Steubing, B.; Reinhard, J.; Moreno-Ruiz, E. & Weidema, B. (2016): *The ecoinvent database version 3 (part I): overview and methodology.* In: *The International Journal of Life Cycle Assessment* 21 (9), S. 1218–1230.

Wikipedia (2019): *Liste von Brennstoffzellenautos in Serienproduktion.* https://de.wikipedia.org/wiki/Liste_von_Brennstoffzellenautos_in_Serienproduktion. Letzter Zugriff am: 20.11.2019.

07 | Anhang

Überblick Klimabilanzen von FCEV

Zu Klimabilanz von BEV wurde bereits in der „Klimabilanz von Elektroautos“ (Agora Verkehrswende 2019b) eine umfangreiche Literaturrecherche und Metastudie durchgeführt, um wichtige Parameter der Klimabilanz zu identifizieren. Im Rahmen dieser Kurzstudie wurden zusätzlich vor allem Klimabilanzen von FCEV ausgewertet. Ähnlich wie bei BEV zeigt sich eine große Bandbreite der auf den gefahrenen Kilometer normierten Klimawirkung.

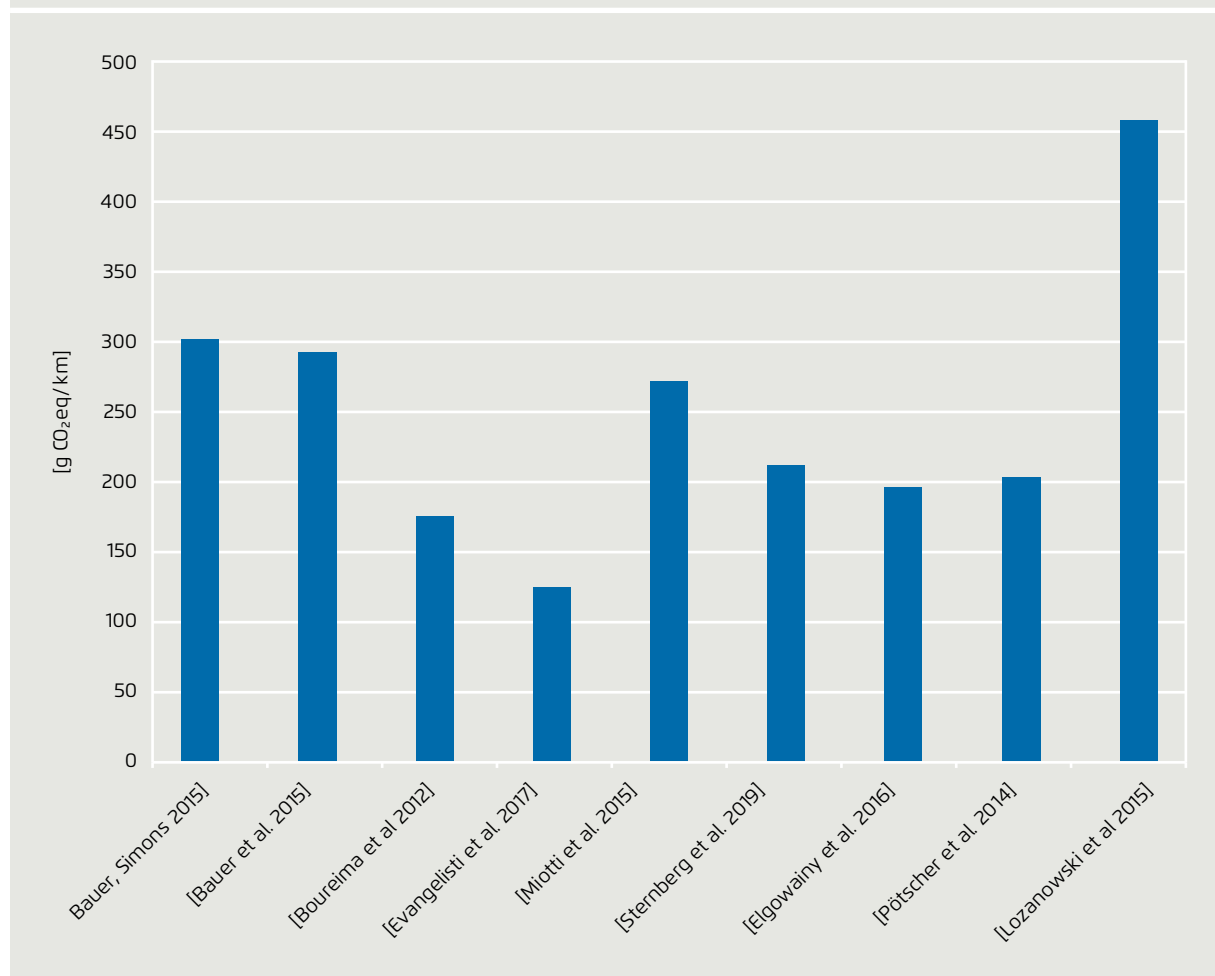
Die meisten Ergebnisse bewegen sich dabei zwischen 200 und 300 g CO₂-Äq. pro Kilometer, es gibt aber auch Angaben von nur 100 g CO₂-Äq. bzw. von bis zu 450 g CO₂-Äq. pro Kilometer (siehe Abbildung 13). Die beiden Ausreißer erklären sich durch den Einfluss der Was-

serstoffbereitstellung: (Lozanovski et al. 2015) bilanziert Wasserstoff rein aus einer Elektrolyse mit dem dänischen Strommix, zudem sind die Verbrauchswerte des SUV im Realbetrieb sehr hoch. (Evangelisti et al. 2017) hingegen verwendet Daten zur Wasserstoffbereitstellung aus der GaBi-Datenbank, in der ein Mix aus Erdgasreformierung, Wasserelektrolyse und Dampfcracken aus Ethan/Naphtha enthalten ist und die zu sehr niedrigen Werten führen.

Einen großen Einfluss auf die Klimabilanz hat also insbesondere die Wasserstoffbereitstellung, sie ist in den meisten Fällen für die Hälfte bis zwei Drittel der gesamten Treibhausgasemissionen verantwort-

Bandbreite der Klimawirkung von Brennstoffzellen-Pkw in der Literatur

Abbildung 13



Eigene Darstellung durch ifeu

lich. Einen Überblick über die wichtigsten Studien zu Wasserstoff-Pkw und die relevanten Einflussparameter auf die Klimabilanz zeigt Tabelle 5. Leider enthalten nur wenige Quellen direkt Angaben zu den Klimabelasten der Brennstoffzelle an sich, die gefundenen Angaben liegen zwischen 18 und 45 kg CO₂-Äq. pro kW Leistung.

Literaturüberblick Studien zur Klimawirkung von Brennstoffzellen-Pkw									Tabelle 5
	[Simons & Bauer 2015]	[Bauer et al. 2015]	[Bou-reima et al. 2012]	[Evangelisti et al. 2017]	[Miotti et al 2015]	[Sternberg et al. 2019]	[Elgowainy et al. 2016]	[Pötscher et al. 2014]	[Lozanowski et al. 2015]
Treibhausgasemissionen (g CO ₂ e/km)	296	291	174	125	270	210	197	203	455
Fahrzeugtyp (oder Klasse)	Kompakt-klasse	VW Passat	Kompakt-klasse	Kompakt-klasse	k. A.	SUV (Nexo)	midsize passenger car	Kompakt-/Mittel-klasse	Hyundai iX35
Hintergrund-datenbank	ecoinvent 2.2	ecoinvent 2.2	ecoinvent 2.2	ecoinvent 3.1 + GaBi	ecoinvent 2.2	ecoinvent 3.5	REET	GEMIS	ecoinvent 3.1 GaBi
Lebensfahr-leistung (km)	150.000	240.000	230.500	150.000	150.000	150.000	284.963	k. A.	150.000
Verbrauch (kg/100 km)	1,03	1,2	1	0,85	1,05	0,95	1,15	0,73	1,28
Fahrzyklus	k. A.	WLTP	NEFZ	NEFZ	NEFZ	WLTP	US	HBEFA 3.1	real
Wasserstoffbereit-stellung	k. A.	SMG	SMG	Mix	SMG	SMG Elektro-lyse (erneuerbar)	SMG Elektro-lyse	SMG	Elektro-lyse
Land	EU	Schweiz	Belgien	k. A.	Europa	Deutschland	US	Österreich	Dänemark
Leistung PEMFC (kW)	46	145	k. A.	80	85	95	–	–	100
Größe H ₂ -Tank (kg)	k. A.	6,8	k. A.	5,6	5,6	5,6	–	–	5,6
Platinbeladung (g/kW)	0,21	–	0,09 kg/Pkw	0,6 mg/cm ³	0,43	0,43	–	–	1
CO ₂ -Emissionen Brennstoffzelle (kg/kW)	–	18,0	–	–	45,3	28	–	–	–

Annahmen und wichtige Ergebnisse der eigenen Modellierung

Tabelle 6

	ICEV		CNG	FCEV		BEV	
Kraftstoff	Benzin / Diesel / PtL		Erdgas CNG / PtG	PtH2		Strom	
Fahrzeugklasse	Kompaktklasse						
Fahrzyklus	Eigene Modellierung der ADAC Ecotest Teilzyklen, Gewichtung der Straßenkategorien nach TREMOD (ifeu)						
Szenarien	Gemischte Nutzung	Langstrecke mit ausschließlich Autobahn-fahrt	Gemischte Nutzung	Gemischte Nutzung	Langstrecke mit ausschließlich Autobahn-fahrt	Gemischte Nutzung	Langstrecke mit ausschließlich Autobahn-fahrt
Verbrauch pro 100km	5,9 l Benzin/ 4,7 l Diesel	5,7 l Diesel	4,6 kg	0,92 kg	1,1 kg	16 kWh	22,7 kWh
Ladeverluste						15% (real 1,15 kWh pro kWh Batterieladung)	
Tankgröße (kg)			17,3 bei 200 bar	5	5		
Lebensfahrleistung (km)*	150.000	200.000	150.000	150.000	200.000	150.000	200.000
Klimawirkung Strom-mix (g CO ₂ /kWh)	Mittlerer dynamischer Strommix in Deutschland (2017-2030) unter der Annahme „Energiewende geht weiter“: 421						
Gesamtemissionsfaktor (well-to-tank) (g CO ₂ -Äq./MJ)	275 für PtL		221 für PtG	190 für PtH2			
Zellchemie						NMC 1:1:1	
Energiedichte (Wh/kg)						115	
Treibhausgasemissionen Batterie/ Brennstoffzelle (kg CO ₂ -Äq./kWh)				29		145	
Batteriekapazität (kWh)				1,3		35	60
Leistung (kW)	100		100	100		100	
Angenommenes Gewicht Fahrzeug-rumpf (kg)	1.300		1.300	1.300		1.300	
Für Modellierung des Antriebs berücksichtigt	Verbrennungsmotor, Getriebe, Zusatzbauteile (z. B. Tank), Abgasanlage und Starter-batterie		Verbrennungsmotor, Getriebe, Zusatzbauteile (z. B. Tank), Abgasanlage und Starter-batterie	Elektromotor, Zusatzbauteile für den elektrischen Antriebsstrang (z. B. Hochvoltkabel, Ladeelektronik, Inverter/ Konverter).		Kleineres Getriebe, Elektromotor, Zusatzbauteile für den elektrischen Antriebsstrang (z. B. Hochvoltkabel, Ladeelektronik, Inverter/Konverter).	
Hintergrunddatenbank Fahrzeugrumpf und Fahrzeugwartung	ecoinvent 3.4						
Hintergrunddatenbank Zusatzkomponenten	keine		ecoinvent 3.5	ecoinvent 3.5		ecoinvent 3.4	
Ergebnis (t CO ₂ -Äq.)	34 bei Benzin / 31 bei Diesel / 78 bei PtL Diesel	44 bei Diesel / 120 bei PtL Diesel	29 bei CNG/ 76 bei PtG	45	64	26	41

* Realistische Lebensfahrleistung, die für die Diskussion verwendet wurde. Dargestellt werden die Ergebnisse in den Abbildungen jedoch für eine Vielzahl von Fahrleistungen (vgl. Abbildungen 10, 11 und 12).

Publikationen von Agora Verkehrswende

Ausgeliefert – wie die Waren zu den Menschen kommen

Zahlen und Fakten zum städtischen Güterverkehr

E-Tretroller im Stadtverkehr

Handlungsempfehlungen für deutsche Städte und Gemeinden zum Umgang mit stationslosen Verleihsystemen

Studie: Verteilnetzausbau für die Energiewende

Elektromobilität im Fokus

15 Eckpunkte für das Klimaschutzgesetz

Klimabilanz von Elektroautos

Einflussfaktoren und Verbesserungspotenzial

Neue Wege in die Verkehrswende

Impulse für Kommunikationskampagnen zum Behaviour Change

Railmap 2030

Bahnpolitische Weichenstellungen für die Verkehrswende

Bikesharing im Blickpunkt

Eine datengestützte Analyse von Fahrradverleihsystemen in Berlin

Parkraummanagement lohnt sich!

Leitfaden für Kommunikation und Verwaltungspraxis

CO₂-Minderung bei Pkw – die Rolle der Steuerpolitik

Ein europäischer Vergleich

Die Kosten von unterlassenem Klimaschutz für den Bundeshaushalt

Die Klimaschutzverpflichtungen Deutschlands bei Verkehr, Gebäuden und Landwirtschaft nach der EU-Effort-Sharing-Entscheidung und der EU-Climate-Action-Verordnung

Umparken – Den öffentlichen Raum gerechter verteilen

Zahlen und Fakten zum Parkraummanagement

Öffentlicher Raum ist mehr wert

Ein Rechtsgutachten zu den Handlungsspielräumen in Kommunen

Klimaschutz im Verkehr: Maßnahmen zur Erreichung des Sektorziels 2030

Bikesharing im Wandel

Handlungsempfehlungen für deutsche Städte und Gemeinden zum Umgang mit stationslosen Systemen

Alle Publikationen finden Sie auf unserer Internetseite: www.agora-verkehrswende.de

Agora Verkehrswende hat zum Ziel, gemeinsam mit Akteuren aus Politik, Wirtschaft, Wissenschaft und Zivilgesellschaft die Grundlagen dafür zu schaffen, dass der Verkehrssektor in Deutschland bis 2050 dekarbonisiert werden kann. Hierfür erarbeiten wir Klimaschutzstrategien und unterstützen deren Umsetzung.



Unter diesem QR-Code steht diese
Publikation als PDF zum Download
zur Verfügung.

Agora Verkehrswende

Anna-Louisa-Karsch-Str. 2 | 10178 Berlin
T +49 (0)30 700 14 35-000
F +49 (0)30 700 14 35-129
www.agora-verkehrswende.de
info@agora-verkehrswende.de

