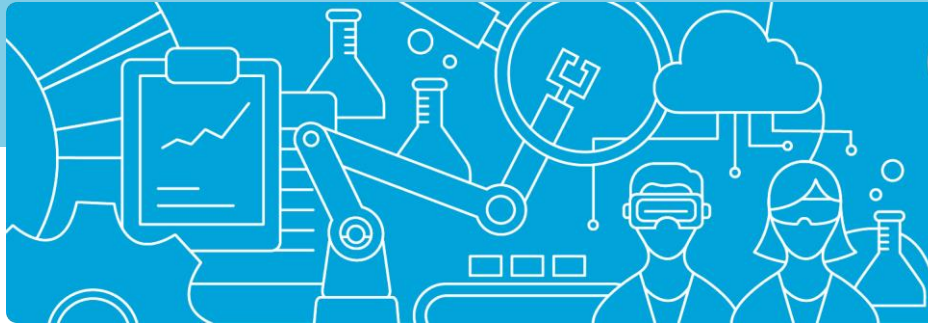


Studie zum deutschen Innovationssystem | Nr. 9-2022



Martin Wietschel, Steffen Link, Kirsten Biemann, Hinrich Helms

Langfristige Umweltbilanz und Zukunftspotenzial alternativer Antriebstechnologien



Diese Studie wurde im Auftrag der Expertenkommission Forschung und Innovation (EFI) erstellt. Die Ergebnisse und Interpretationen liegen in der alleinigen Verantwortung der durchführenden Institute. Die EFI hat auf die Abfassung des Berichts keinen Einfluss genommen.

Durchführende Institute

Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI
Breslauer Straße 48, 76139 Karlsruhe
www.isi.fraunhofer.de

Ifeu-Institut für Energie und Umwelttechnik Heidelberg gGmbH
Wilckenstraße 3, 69120 Heidelberg
www.ifeu.de

Studien zum deutschen Innovationssystem

Nr. 9-2022
ISSN 1613-4338

Stand

Februar 2022

Herausgeberin

Expertenkommission Forschung und Innovation (EFI)

Geschäftsstelle

Pariser Platz 6 | 10117 Berlin
www.e-fi.de

Alle Rechte vorbehalten, insbesondere das Recht auf Vervielfältigung und Verbreitung sowie die Übersetzung. Kein Teil des Werkes darf in irgendeiner Form (durch Fotokopie, Mikrofilm oder ein anderes Verfahren) ohne schriftliche Genehmigung der EFI oder der Institute reproduziert oder unter Verwendung elektronischer Systeme gespeichert, verarbeitet, vervielfältigt oder verbreitet werden.

Kontakt und weitere Informationen

Prof. Dr. Martin Wietschel
Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI
Competence Center Energietechnologien und Energiesysteme
Breslauer Straße 48, 76139 Karlsruhe
T + 49 (0) 721 6809 254
M martin.wietschel@isi.fraunhofer.de

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung	4
1 Einführung	6
2 Untersuchte Fahrzeuge und Fahrzeugparameter	8
2.1 Untersuchte Fahrzeuge	8
2.2 Fahrzeugparameter	10
3 Treibhausgasemissionen, Luftschadstoffe und kritische Rohstoffe	14
3.1 Grundlagen der Umweltbewertung	14
3.2 Emissionen aus der Herstellung von Strom	14
3.2.1 Einleitung	14
3.2.2 Treibhausgasemissionen aus der Stromerzeugung – Diskussion verschiedener Ansätze	15
3.2.3 Treibhausgasemissionen aus der Stromerzeugung – Angenommene Werte	19
3.2.4 Feinstaub- und Stickoxidemissionen aus der Stromerzeugung	21
3.3 Emissionen aus der Herstellung von Kraftstoffen	21
3.3.1 Treibhausgasemissionen aus der Herstellung fossiler Kraftstoffe und Biokraftstoffe	21
3.3.2 Treibhausgasemissionen aus der Herstellung von synthetischen strombasierten Kraftstoffen	22
3.3.3 Treibhausgasemissionen aus der Herstellung von Wasserstoff	23
3.4 Emissionen aus der Fahrzeugproduktion und -Entsorgung	23
3.5 Emissionen aus der Wartung sowie direkte Auspuffemissionen	30
3.6 Vergleich der Treibhausgasemissionen	31
3.7 Vergleich der Stickoxid- und Feinstaubemissionen	35
3.8 Vergleich der kritischen Rohstoffe	39
4 Wirtschaftlichkeit	42
4.1 Methode der TCO-Berechnung	42
4.2 Vergleich der Wirtschaftlichkeit	42
4.2.1 Ergebnisse der Kostenanalyse für Pkw	42
4.2.2 Treibhausgasminderungskosten	45
5 Kritische Diskussion ausgewählter Aspekte	48
6 Zusammenfassung und Schlussfolgerungen	52
7 Abbildungsverzeichnis	58
8 Tabellenverzeichnis	59
9 Literaturverzeichnis	60

Kurzfassung

Die Zielsetzung der Studie ist es eine wirtschaftliche und ökologische Analyse und Bewertung von alternativen Kraftstoffen und Antrieben bei Pkw vor dem Hintergrund der verschärften deutschen Klimaschutzziele vorzunehmen und politischen Entscheidungsträgern Handlungsempfehlungen zu geben.

Die Analysen werden für Fahrzeuge der Kompaktklasse angefertigt. Die ökologische Bewertung erfolgt nach der Life-Cycle-Assessment-Methodik, bei der alle Emissionen der Produktions-, Nutzungs- und Entsorgungsphase erfasst werden. Neben einer Klimabilanz werden auch Bilanzen für Luftschadstoffe vorgenommen sowie kritische Rohstoffe behandelt. Die ökonomischen Auswertungen basieren auf dem Total-Cost-of-Ownership-Ansatz, der alle Kosten einer Anschaffung und Nutzung eines Pkws erfasst.

Bei den batterieelektrischen Fahrzeugen (BEV), Plug-in-Hybriden (PHEV), Brennstoffzellenfahrzeugen (FCEV) und den strombasierten synthetischen Kraftstoffen hat die Art der Stromerzeugung einen sehr großen Einfluss auf die Klimabilanz. In dieser Studie wird ein Szenario der Stromherstellung unterstellt, bei dem die aktuellen klimapolitischen Ziele eingehalten werden und eine erhöhte Stromnachfrage aus dem Verkehr integriert ist.

Die gesetzten politischen Klimaschutzziele für den Verkehr in Deutschland erfordern ein sehr schnelles Handeln. Dies wird überwiegend durch einen Antriebswechsel auf die batterieelektrische Mobilität in Deutschland bis 2030 und darüber hinaus erreicht werden können. Die neuen verschärften Klimaschutzziele, wenn sie denn erreicht werden, erhöhen die deutlich positive Klimabilanz von BEV gegenüber den konventionellen Fahrzeugen. Elektrofahrzeuge stehen heute schon in größerem Umfang kommerziell zur Verfügung und sie sind die wirtschaftlichste und energieeffizienteste der aktuell zur Verfügung stehenden Minderungsoptionen mit hohem Potenzial. Die Herausforderung besteht darin, dass der Geschwindigkeit der Marktdurchdringung gewisse Grenzen gesetzt sind, u. a. durch die Entwicklung von neuen Fahrzeugmodellen, dem Aufbau von Produktionskapazitäten und der privaten und öffentlichen Ladeinfrastruktur. Aufgrund des hohen ökologischen Rucksack in der Herstellung durch die Batterieproduktion besteht die Anforderung, diesen künftig deutlich abzusenken, was technisch machbar ist.

PHEV können, wenn sie einen nennenswerten Teil ihrer Fahrten elektrisch zurücklegen, kurzfristig ebenfalls zur Senkung von THG-Emissionen beitragen. Da sie aber mittel- und langfristig zur Erreichung der Klimaziele auch mit synthetische Kraftstoffen betrieben werden müssen und diese in der Herstellung sehr teuer sind, sind sie eher als Brückentechnologie zu bewerten. Eine Förderung sollte deshalb immer den Aspekt vor Augen haben, ob sich hier nicht langfristig eine technologische Sackgasse ergeben könnte.

Biogas ist wirtschaftlich und wenn Nachhaltigkeitskriterien beachtet werden auch ökologisch eine sinnvolle Alternative. Da aber nachhaltige Biomasse potenzialbeschränkt ist und andere Sektoren in der Mobilität wie der internationale Flugverkehr oder der Industrie wegen fehlender Alternativen dringenden auf sie angewiesen ist, wird ihr Einsatz bei Pkw eher kritisch gesehen, zumindest mittel- und langfristig.

Strombasierte synthetische Kraftstoffe sind sehr teuer in der Herstellung, benötigen einen sehr hohen Ausbaubedarf an Erneuerbaren und der Aufbau von Erzeugungs- und Transportkapazitäten ist zeit- und kapitalintensiv. Wie bei der Biomasse stellt sich die Frage, ob sie nicht eher

in anderen Anwendungsbereichen dringender zur Defossilierung benötigt werden. Deshalb wird der mögliche Einsatz von synthetischen Kraftstoffen bei Pkw in nennenswerten Umfang aus heutiger Perspektive eher als unwahrscheinlich eingestuft.

FCEV sind heute noch sehr teuer in der Anschaffung und der Nutzung und ihr kurzfristiger Beitrag zur THG-Senkung in Deutschland im Pkw-Sektor wird nur sehr begrenzt sein können. Allerdings können sie langfristig (nach 2030) eine Ergänzung zu den Batteriefahrzeugen bei großen und schweren Fahrzeugen mit hohen Reichweitenanforderungen darstellen. Im Sinne der Technologieoffenheit sollten sie als Option weiter betrachtet werden. Wie Batteriefahrzeuge haben sie heute noch einen hohen ökologischen Rucksack in der Herstellung, der künftig deutlich reduziert werden muss.

Eine Problemverlagerung in andere Umweltbereiche durch den Klimaschutz ist zu vermeiden. BEV, PHEV und FCEV sind im Vergleich zu den konventionellen Antrieben besonders kritisch beim nicht regenerativen abiotischen Ressourcenverbrauch, den Mineralien und Metallen. Ein verminderter Materialeinsatz oder eine Materialsubstitution, Recycling und bei BEV sowie PHEV eine Zweitnutzung der Batterie sind hier sinnvolle Maßnahmen. In den anderen relevanten Umweltkategorien, insbesondere des kumulierten Energieverbrauchs, schneiden BEV, PHEV und FCEV hingegen vergleichsweise gut ab.

Synthetische Kraftstoffe haben nur einen nennenswerten Vorteil bei der Klimabilanz, wenn sie ausschließlich oder zumindest überwiegend aus erneuerbarem Strom hergestellt werden; kritisch bleiben bei diesen dann insbesondere der Flächen-, Wasser- und Energieverbrauch.

Alle untersuchten Alternativen bieten, wenn die Energiewende voranschreitet, mittelfristig ein relevantes Potenzial zur Minderung der Treibhausgase während der Nutzungsphase vom Pkw. Wird dieses Potenzial genutzt, rückt künftig immer mehr die Herstellung der Pkw in den Fokus. Hier bieten sich für alle Pkw-Antriebe noch signifikante THG-Minderungspotenziale, beispielsweise bei der Herstellung von Stahl, Flachglas oder Chemierohstoffen.

1 Einführung

Mit der Novelle des deutschen Klimaschutzgesetzes wurden die Klimaziele noch einmal deutlich verschärft. Für das Jahr 2040 gilt ein Minderungsziel von mindestens 88 %. Auf dem Weg dorthin sieht das Gesetz in den 2030er-Jahren konkrete jährliche Minderungsziele vor. Bis zum Jahr 2045 soll Deutschland Treibhausgasneutralität erreichen: Es muss dann also ein Gleichgewicht zwischen Treibhausgas (THG)-Emissionen und deren Abbau herrschen. Nach dem Jahr 2050 strebt die Bundesregierung negative Emissionen an. Dann soll Deutschland mehr Treibhausgase in natürlichen Senken einbinden, als es ausstößt.

Die höheren Ambitionen wirken sich auch auf die CO₂-Minderungsziele bis zum Jahr 2030 in den einzelnen Sektoren aus. So muss der Verkehrssektor, dessen CO₂-Emissionen in den letzten Jahren nicht gesunken sind, bis 2030 von heute knapp 150 Mio. tCO₂ bis 2030 auf 85 Mio. tCO₂ herunterkommen. Der Verkehrssektor steht damit vor einer großen Herausforderung. Ein erheblicher Teil der Minderung muss aus dem Pkw-Bereich kommen, der den höchsten Anteil an den THG-Emissionen derzeit in Deutschland im Mobilitätsbereich hat. Neben dem Wechsel auf andere Verkehrsträger, wie dem ÖPNV oder dem Fahrrad, und Reduzierung der Verkehrsleistung kommt dem Wechsel auf umweltfreundliche alternative Kraftstoffe und Antriebssysteme bei Pkw eine Schlüsselrolle zu. Die hierfür in Betracht kommenden Alternativen sind batterieelektrische Fahrzeuge, Brennstoffzellenfahrzeuge sowie Verbrenner mit synthetischen Kraftstoffen und Biokraftstoffe.

In letzter Zeit wurde eine Reihe an wissenschaftlichen Studien zur Klimabilanz von Elektro-Pkw veröffentlicht (siehe z. B. Agora 2019a, Kämper et al. 2020, Hill et al. 2020, VDI 2020, Wietschel et al. 2019a, 2019c sowie Wietschel 2020a). Darin wurden die wichtigsten Einflussfaktoren auf die Treibhausgasbilanz von Elektro-Pkw wie folgt identifiziert: Strombereitstellung, Batterieherstellung, nominaler oder realer Pkw-Verbrauch, Lebensfahrleistung und Reichweite (bzw. die Batteriegröße). Fast alle Studien sehen dabei deutliche Klimavorteile für Elektro-Pkw gegenüber konventionellen Pkw auch unter Einbezug der gesamten Prozesskette und bei einer Nutzung in Deutschland. Nur sehr wenige dieser Publikationen befassen sich auch mit Erdgas-Pkw oder Brennstoffzellen-Pkw, wie z. B. Agora (2019b), Wietschel et al. (2019c), IAV (2021) und Hill et al. (2020). In den meisten Fällen liegt der Fokus der Studien vor allem auf den Treibhausgasemissionen. Hill et al. (2020) enthält jedoch auch eine umfangreiche Bilanzierung weiterer Umweltwirkungen wie z. B. Versauerung und Eutrophierung.

Das übergeordnete Ziel der vorliegenden Studie ist es, die wichtigsten Alternativen bei Pkw unter ökologischen und ökonomischen Kriterien zu bewerten. Dabei sollen gesicherte Erkenntnisse der alternativen Antriebstechnologien unter Berücksichtigung des sich verändernden Umfelds dargestellt sowie aufgezeigt werden, welche Antriebsalternativen am ehesten und gesamtwirtschaftlich am günstigsten zur Erreichung der deutschen Klimaziele beitragen können. Hierdurch soll politischen Entscheidungsträgern eine Entscheidungsunterstützung geboten werden.

Die Bewertung der Klimabilanz erfolgt anhand einer Ökobilanz. Neben der Bewertung der Klimabilanz werden auch wichtige Luftschadstoffe ausgewertet und auf kritische Rohstoffe eingegangen. Die Bewertung der Wirtschaftlichkeit erfolgt anhand einer Total-Cost-of-Ownership-Rechnung, wobei dies nicht aus Nutzersicht erfolgt, sondern aus einer volkswirtschaftlichen Perspektive. Bei dieser werden bestehende Staatseingriffe durch Steuern, Abgaben und

Subventionen nicht berücksichtigt. Durch die Zusammenführung der Klimabilanz sowie der Kosten sollen Treibhausgasvermeidungskosten der einzelnen Alternativen quantifiziert werden und somit den politischen Entscheidungsträgern Hinweise geliefert werden, wie die einzelnen Alternativen im Vergleich heute und zukünftig dastehen.

Eine Bewertung von staatlichen Steuerungsinstrumenten oder die Bewertung von volkswirtschaftlichen Auswirkungen, z.B. auf Arbeitsplätze, erfolgt in der Studie nicht.

Die quantitativen Analysen werden für repräsentative Pkw der Kompaktklasse durchgeführt. Als Alternativen, die den konventionellen Pkw gegenübergestellt werden, werden batterieelektrische Pkw, Brennstoffzellen-Pkw und verbrennungsmotorische Pkw mit synthetischen Kraftstoffen sowie Biogas betrachtet. Die Analysen erfolgen unter den Rahmenbedingungen in Deutschland und werden für Pkw, die in 2020 und 2030 angeschafft werden, durchgeführt. Potenzielle dynamische Entwicklung wie der Wandel der Stromerzeugung oder mögliche neue Standorte der Batteriezellenproduktion werden dabei berücksichtigt. Weiterhin wird ein Ausblick auf längerfristige Entwicklungen gegeben. Die eigenen Analysen werden durch Ergebnisse von anderen Studien ergänzt, um eine breitere Diskussion zu ermöglichen.

Im folgenden Kapitel 2 werden die untersuchten Fahrzeuge, die Kraftstoff- und Strompfade sowie die technischen und ökonomischen Parameter vorgestellt. Im dritten Kapitel wird zuerst auf die Methodik der ökologischen Bewertung eingegangen. Dann werden die wichtigsten Eingangsparameter für diese diskutiert und die getroffenen Annahmen präsentiert. Da die Bewertung der THG-Emissionen aus der Stromerzeugung für fast alle der betrachteten Alternativen ganz entscheidend ist, wird auf diesen Aspekt sehr ausführlich eingegangen. Aber auch die Produktionsphase bei Pkw ist gerade bei den batterieelektrischen und den Brennstoffzellen-Fahrzeugen wichtig, weshalb auch diese detaillierter behandelt wird. Abschließend werden die Ergebnisse des Vergleichs der untersuchten Pkws dargestellt.

Das vierte Kapitel behandelt die Wirtschaftlichkeit. Nach einer Einführung in die Methodik werden dann die Ergebnisse präsentiert. Im Kapitel 5 erfolgt eine kritische Diskussion ausgewählter Aspekte. Im Kapitel 6 wird dann die Studie zusammengefasst und Schlussfolgerungen gezogen.

2 Untersuchte Fahrzeuge und Fahrzeugparameter

2.1 Untersuchte Fahrzeuge

Es werden Untersuchungen für Fahrzeuge, die in 2020 angeschafft werden und dann über die nächsten 15 Jahre betrieben werden sowie für Fahrzeuge, die in 2030 angeschafft werden und dann wiederum 15 Jahre genutzt werden, durchgeführt.

Als Fahrzeugtyp, der detailliert untersucht wird, wird die Kompaktklasse (z. B. VW Golf) festgelegt. Um ein möglichst repräsentatives Fahrzeug abzubilden, werden dann die fünf meistverkauften Fahrzeuge im Kompaktklassensegment anhand der KBA-Neuzulassungen im Jahr 2020 herangezogen. Daraus wird ein generisches Modellfahrzeug berechnet, wobei über verschiedene Ausstattungsvarianten der Modelle gemittelt wurde. Die techno-ökonomischen Parameter des Modellfahrzeugs setzen sich aus Fahrzeugeigenschaften wie Fahrzeugmasse, Antriebsleistung, ggf. Batteriekapazität bzw. Tankgröße, Kraftstoff- bzw. Stromverbrauch sowie Anschaffungspreis zusammen. Da nicht genügend Brennstoffzellenfahrzeuge in der Kompaktklasse zur Verfügung stehen, wird das Modellfahrzeug anhand des Mittelklasse-Fahrzeugs Toyota Mirai II approximiert und auf die Kompaktklasse skaliert. Für die Entwicklung der Parameter in den Jahren 2030 und 2040 wird dann auf Erkenntnisse und Handlungsempfehlungen aus Studien wie Hill et al. (2016), Sens et al. (2020), Prussi et al. (2020) oder Plötz et al. (2020) zurückgegriffen. Insgesamt ist dieser Bericht in Anlehnung an die Studie BIT et al. (2021) entstanden. Ein Auszug der genannten Studie ist ebenfalls in Moll und Link (2021) zu finden.

Als Antriebe werden folgende betrachtet:

- **Konventioneller Benzin**; in 2020 ohne Hybridisierung, wegen der Mehrheit an so verkauften Fahrzeugen; in 2030 mit einer Full Hybridisierung¹ aus Klimaschutzüberlegungen
- **Konventionaler Diesel**; in 2020 ohne Hybridisierung, wegen der Mehrheit an so verkauften Fahrzeugen; in 2030 mit einer Full Hybridisierung aus Klimaschutzüberlegungen
- **Erdgas**
- **Biogas**; zu 100 % mit Biogas betrieben; in Realität erfolgt heute eine rechnerische Beimischung zum Erdgas
- **BEV (Battery Electric Vehicle, batterieelektrisches Fahrzeug) Strommix**; Strombilanzierung während der Nutzungsphase erfolgt über die durchschnittlichen THG-Emissionen in Deutschland
- **BEV Sensitivität 100 % EE Strom**; Strombilanzierung während der Nutzungsphase erfolgt über die THG-Emissionen 100 % aus Erneuerbaren
- **BEV Strommix Sensitivität Batterieersatz**; ein Ersatz nach der Hälfte der Laufzeit

¹ Die verschiedenen Hybrid-Fahrzeuge unterscheiden sich im Wesentlichen in der installierten elektrischen Leistung, den elektrischen Funktionen sowie der rein elektrischen Reichweite. Unter Mild-Hybrid-Antrieben werden leicht elektrifizierte verbrennungsmotorische Antriebe mit einem 48V-Bordnetz verstanden, welches beispielsweise eine Stopp-Start-Automatik sowie elektrisches Segeln, Bremsenergieerückgewinnung, elektrisches Boosten und elektrisches Fahren bei niedrigen Geschwindigkeiten erlaubt. Die Leistung der elektrischen Maschine ist vergleichsweise gering. Full-Hybrid-Antriebe verfügen über eine größere elektrische Leistung, welche rein elektrisches Fahren auch bei höheren Geschwindigkeiten ermöglicht. Sie können allerdings gegenüber den Plug-in-Hybriden nicht extern mit Strom aufgeladen werden.

- **PHEV (Plug-in-Hybrid: Verbrenner und Batterie kombiniert mit externer Lademöglichkeit der Batterie) Strommix;** Strombilanzierung während der Nutzungsphase im elektrischen Fahrantrieb erfolgt über die durchschnittlichen THG-Emissionen in Deutschland
- **FCEV (Fuel Cell Electric Vehicle, Brennstoffzellenfahrzeug) Strommix;** Strombilanzierung zur Herstellung des Wasserstoffes während der Nutzungsphase erfolgt über die durchschnittlichen THG-Emissionen in Deutschland
- **FCEV Sensitivität 100 % EE-Strom;** Strombilanzierung zur Herstellung des Wasserstoffes während der Nutzungsphase erfolgt über die THG-Emissionen 100 % aus Erneuerbaren
- **Synthetischer Benzin-Strommix;** Strombilanzierung zur Herstellung des synthetischen Benzins während der Nutzungsphase erfolgt über die durchschnittlichen THG-Emissionen in Deutschland
- **Synthetisches Benzin Sensitivität 100 % EE-Strom;** Strombilanzierung zur Herstellung des synthetischen Benzins während der Nutzungsphase erfolgt über die THG-Emissionen 100 % aus Erneuerbaren

Ein wichtiges Merkmal der Untersuchung, welches einen relevanten Einfluss auf die Ergebnisse hat, ist die Berechnung auf Basis von realen Verbrauchswerten. Einige LCA-Studien, z. B. VDI (2020), basieren auf Normwerten. Diese unterschätzen den Verbrauch jedoch recht deutlich. Da wie später gezeigt wird, die Nutzungsphase einen hohen Einfluss auf die Klimabilanz hat und hier z. B. die BEV einen Vorteil gegenüber den konventionellen Fahrzeugen aufweisen, werden bei Rechnungen mit Normwerten die konventionellen Fahrzeuge bevorzugt.

Fahrzeughersteller bieten heute für die Kilometer-Leistungen sowie für die Nutzungsjahre vergleichbare Garantieleistungen für BEV wie auch für die konventionellen Fahrzeuge an. Auch wenn man sich die Datenblätter von den Batteriezellherstellern anschaut², versprechen sie oftmals eine ausreichende Lebensdauer für das Einsatzszenario, wie es in dieser Studie unterstellt wird. Trotzdem wird bei den BEV noch die Sensitivität gerechnet, dass die Fahrzeugbatterie nach der Hälfte der Zeit komplett ausgetauscht werden muss. Bei den Alterungsmechanismen der Batterie wird typischerweise zwischen der kalendarischen Alterung und der zyklischen Alterung unterschieden. Erstere beschränkt die Lebensdauer einer Batterie ohne Belastung, bspw. während der Lagerung. Letztere ergibt sich durch die elektrische Nutzung der Batterie, wobei dieser Effekt wiederum von der kalendarischen Alterung überlagert wird (siehe de Gennaro et al. 2020, Barré et al. 2013 und Preger et al. 2020). Aktuell wird eine Reihe an unterschiedlichen Batteriezellentypen für BEV eingesetzt. Diese unterscheiden sich zum Teil recht deutlich in ihren Eigenschaften (siehe Rahimzei et al. 2015). Dies gilt auch für die Lebensdauer. Weiterhin liegen bisher nur wenige empirische Erfahrungen mit dem Alterungsverhalten von Batterien vor³. Gerade die kalendarische Alterung könnte evtl. für einige Zellchemien eine Herausforderung darstellen. Weiterhin muss beachtet werden, dass die Lebensdauer von Dingen wie der Laderate, der Tiefentladung und der Außentemperatur abhängig ist. Aus diesem Grund wird diese Sensitivität für 2020 gerechnet. Für 2030 erfolgt eine derartige Berechnung nicht, da nach heutigem Stand davon ausgegangen werden kann, dass die Lebensdauer der Batterie dann ausrei-

² siehe z.B. <https://kokam.com/download>

³ Für Tesla-Modelle liegen Daten vor, siehe Steinbuch 2020. Diese zeigen eher geringe kalendarische und zyklische Alterungserscheinungen, aber insbesondere sind die genutzten Jahre noch recht gering.

chend ist. Hier könnte man sogar über deutliche höhere Lebensdauern der Batterie nachdenken, z. B. bietet die derzeit schon eingesetzte Lithium-Eisen-Phosphat-Batterie (LFP) eine deutlich höhere Lebensdauer wie NMC-basierte Batteriezellen (siehe Rahimzei et al. 2015).

Auch bei den FCEV stellt sich derzeit noch die Frage nach der Lebensdauer der Brennstoffzelle (siehe IAV 2021). In dieser Studie wird aber unterstellt, dass sie über die gesamte Nutzungsdauer nicht ausgetauscht werden muss.

Wie im noch folgenden Kapitel 3.2 ausführlich diskutiert, werden bei der LCA üblicherweise die durchschnittlichen THG-Emissionen aus dem Stromsystem unterstellt. Allerdings wird in dem Kapitel auch diskutiert, dass zum Aufzeigen des Potenzials auch mit 100 % erneuerbarem Strom gerechnet werden kann. Dies wird für die strombasierten Lösungen als Sensitivität unterstellt.

2.2 Fahrzeugparameter

In der Tabelle 1 werden die wichtigsten technischen Fahrzeugparameter, zuzüglich der getroffenen Annahmen, aufgezeigt. Dem aktuellen Stand wird das Jahr 2030 gegenübergestellt. In der Tabelle 2 sind die relevanten wirtschaftlichen Fahrzeugparameter aufgeführt und in der Tabelle 3 dann die unterstellten Kraftstoff- und Strompreise.

Tabelle 1: Technische Fahrzeugparameter Kompaktklasse in Anlehnung an BIT et al. 2021

Parameter	2020	2030
Fahrleistung Lebensdauer [km]	187.500	187.500
Anmerkung nach Moll und Link (2021): Die Fahrleistung wird anhand der durchschnittlichen Jahresfahrleistung eines Kompaktklasse-Fahrzeugs nach Statistiken des KBA (KBA 2021) sowie BASt (2017) ermittelt. Über eine Nutzungsdauer von 15 Jahre entspricht dies 12.500 km pro Jahr. Zusätzlich wird eine für Deutschland typische Abhängigkeit der Jahresfahrleistung nach Fahrzeugalter unterstellt (BASt 2017, BMVI 2019, KBA 2021). Dies führt dazu, dass Neufahrzeuge eine höhere Fahrleistung aufweisen (140 %) als Fahrzeuge am Ende der Nutzungsdauer (70 %).		
Nutzungsdauer [Jahre]	15	15
Hill et al. 2020		
Realer Kraftstoffverbrauch Diesel [l/100km]	5,9	5,5
Anmerkung: Realverbrauch auf Basis von Zertifizierungswerten (WLTC) der herangezogenen Modelle und zusätzlich einem antriebsstrang-spezifischem Aufschlag zur Berücksichtigung des Realverbrauchs basierend auf dem Datenpool des ADAC Ecotest (ADAC 2021), Daten aus Spritmonitor.de und der Studie des ICCT (ICCT 2019). Für das Jahr 2030 werden u.a. Erkenntnisse aus Sens et al. 2020 zur technologischen Weiterentwicklung herangezogen, woraus eine Verbesserung der Technologie von rund 7 % angenommen wird.		
Realer Kraftstoffverbrauch Benzin [l/100km]	7,1	5,6
Anmerkung: Siehe Diesel. Im Gegensatz zum Diesel wird eine größere technologische Weiterentwicklung und Effekt der Hybridisierung unterstellt (vgl. Prussi et al. 2020). Die Verbesserung der Technologie wird mit rund 20 % angenommen.		
Realer Kraftstoffverbrauch Erdgas [kg/100 km]	4,7	3,8
Anmerkung: Siehe Diesel. Im Gegensatz zum Diesel wird eine größere technologische Weiterentwicklung und Effekt der Hybridisierung unterstellt (vgl. Prussi et al. 2020). Die Verbesserung der Technologie wird mit rund 20 % im monovalenten Betrieb angenommen.		
Realer Kraftstoffverbrauch BEV [kWh/100km]	18,8	16,9
Anmerkung: Siehe Diesel. Der Aufschlag inkludiert zusätzliche Ladeverluste. Die Verbesserung der Technologie wird mit rund 10 % angenommen.		
Realer Kraftstoffverbrauch PHEV [kWh/100km]	3,4 l + 11,0 kWh	1,8 l + 13,2 kWh
Anmerkung: Realverbrauch auf Basis von Zertifizierungswerten (WLTC) der herangezogenen Modelle und zusätzlich einem Aufschlag zur Berücksichtigung des realen elektrischen Fahranteils bzw. Realverbrauchs nach Plötz et al. 2020. Für Plug-in-Hybrid-Antriebe wird in 2030 mit einer signifikanten Anhebung der elektrischen Reichweite sowie mit einer Verschiebung des Utility Faktors hin zu höheren elektrischen Fahranteilen gerechnet (vgl. Plötz 2020 und NPM 2020)		
Realer Kraftstoffverbrauch FCEV [kg/100 km]	1	0,8
Anmerkung: Realverbrauch in Anlehnung an das Ergebnis des Toyota Mirai II im ADAC Ecotest (ADAC 2021) gegenüber dem offiziellen Zertifizierungswert (WLTC) von 0,76 kg/100km.		
Durchschnittskapazität Fahrzeugbatterie E-Pkw [kWh]	55	69
2020 als repräsentativer Wert in der Kompaktklasse (bspw. Kia e-Niro 39 bis 64 kWh, Nissan Leaf 40 bis 62 kWh, Volkswagen ID.3 58 bis 77 kWh, Citroen C3 E-Tense 50 kWh). Angabe als Bruttobatteriekapazität 2030 eigene Annahmen (2020: reale durchschnittliche Reichweite 280 km; 2030: reale durchschnittliche Reichweite 380 km, für 2030 auch höhere Ladeleistung angenommen zur Reduzierung der Ladezeit)		

Tabelle 2: Ökonomische Fahrzeugparameter Kompaktklasse (ohne Steuern, real) in Anlehnung an BIT et al. 2021

Parameter	2020	2030
Anschaffungspreis Benzin-Pkw [€]	23.100	26.500
Anmerkung: Preisbestimmung in 2020 anhand der modell-spezifischen Marktpreisangaben im ADAC Autokostenrechner, gemittelt über die Ausstattung (ADAC 2020a). Preisentwicklung 2030 zuzüglich Kosten zur Effizienzsteigerung, Abgasnachbehandlung und Hybridisierung nach Hill et al. 2016.		
Anschaffungspreis Diesel-Pkw [€]	24.700	27.900
Anmerkung: siehe Benzin		
Anschaffungspreis CNG-Pkw [€]	24.600	25.000
Anmerkung: siehe Benzin und vgl. Mehrkosten Benzin-Pkw versus CNG-Pkw nach Wietschel et al. 2019		
Anschaffungspreis BEV [€]	34.300	29.600
- Anmerkung: Preisbestimmung in 2020 anhand der modell-spezifischen Marktpreisangaben im ADAC Autokostenrechner, gemittelt über die Ausstattung (ADAC 2020a). Preisentwicklung 2030 durch spezifische Kostenentwicklung der Hauptkomponenten modelliert. Weitere Details in Moll und Link 2021 - HE-Batteriekosten 2020 150 €/kWh, 2030, 80 €/kWh, vgl. Moll und Link (2021), Kosten Batterieersatz 2028 5.200 €, eigene Annahme		
Anschaffungspreis PHEV [€]	29.200	29.700
- Anmerkung: Preisbestimmung in 2020 anhand der modell-spezifischen Marktpreisangaben im ADAC Autokostenrechner, gemittelt über die Ausstattung (ADAC 2020a). Preisentwicklung 2030 durch spezifische Kostenentwicklung der Komponenten modelliert. Weitere Details in Moll und Link 2021 - HP-Batteriekosten 2020 165 €/kWh, 2030 88 €/kWh, Faktor 1,5 gegenüber BEV Batterie (Zapf et al. 2020) - Batteriegröße 2020 13,4 kWh (reale el. Reichweite 50 km), 2030 22 kWh (reale el. Reichweite 90 km, eigene Annahme)		
Anschaffungspreis FCEV [€]	43.300	36.900
- Anmerkung: Preis 2020 skaliert auf Basis der Marktpreisangaben im ADAC Autokostenrechner für den Toyota Mirai II (ADAC 2020a). Preisentwicklung durch spezifische Kostenentwicklung der Komponenten modelliert. - Brennstoffzellen 2020 234 €/kW, 2030 80 €/kW, 2040 60 €/kW		
Wartung, Reparatur, Reifen, Schmiermittel Benzin-Pkw [€/km]	0,0485	0,0485
Anmerkung: ADAC Autokostenrechner 2020 (ADAC 2020b)		
Wartung, Reparatur, Reifen, Schmiermittel Diesel-Pkw [€/km]	0,0509	0,0509
Anmerkung: ADAC Autokostenrechner 2020 (ADAC 2020b)		
Wartung, Reparatur, Reifen, Schmiermittel CNG-Pkw [€/km]	0,0558	0,0558
Anmerkung: 15 % Mehrkosten gegenüber Benzin nach Wietschel et al. 2019c		
Wartung, Reparatur, Reifen, Schmiermittel BEV [€/km]	0,0310	0,0310
Annahme: 64 % gegenüber dem Benziner (Mittelwert Literatur). Spannweite in der Literatur von 50 % (Agora 2018, Harto 2020), 69 % (Plötz et al. 2014), 70% (Wietschel et al. 2019c; Stahl Consulting 2020), 78 % (Letmathe und Suares 2017) bis 81 % (Propfe et al. 2012).		
Wartung, Reparatur, Reifen, Schmiermittel PHEV [€/km]	0,0432	0,0349
Annahme: 89 % gegenüber dem Benziner in 2020, 72 % in 2030 durch höhere el. Fahranteile. Spannweite in der Literatur von 50 % (Harto 2020), 89 % (Plötz et al. 2014) bis 93 % (Propfe et al. 2012).		
Wartung, Reparatur, Reifen, Schmiermittel FCEV [€/km]	0,0412	0,0412
Anmerkung: In 2020 85 % gegenüber dem Benziner (eigene Annahme)		
Volkswirtschaftlicher Zinssatz [%]	2	2
Ableitbar aus langfristiger Staatsverschuldung, siehe Wietschel et al. 2019b		

Tabelle 3: Reale Kraftstoff- und Strompreise (ohne Steuern und Abgaben)

Parameter	2020	2030	2050
Benzinpreis Tankstelle [€/kWh]	0,066	0,073	0,063
In Anlehnung an BMWi (2021)			
Dieselpreis Tankstelle [€/kWh]	0,072	0,078	0,066
In Anlehnung an BMWi (2021)			
Gaspreis Tankstelle [€/kWh]	0,064	0,054	0,078
In Anlehnung an BMWi (2021)			
H₂-Preis Tankstelle [€/kWh]	0,313	0,22	0,18
Eigene Annahmen basierend auf Robinius et al. 2018, BMWi 2021, Prognos 2020 und Wietschel et al. 2019c			
Preis synthetisches Gas Tankstelle [€/kWh]	0,3	0,225	0,162
Eigene Annahmen basierend auf BMWi 2021, Prognos 2020 und Wietschel et al. 2019c			
Preis synthetischer Flüssigkraftstoff Tankstelle [€/kWh]	0,3	0,245	0,181
Eigene Annahmen basierend auf BMWi 2021, Prognos 2020 und Wietschel et al. 2019c			
Biogaspreis Tankstelle [€/kWh]	0,095	0,099	0,073
- Eigene Annahmen in Anlehnung auf Wietschel 2019c und Edel et al. 2019 - Gestehungskosten variieren in den Literaturquellen stark und sind abhängig von verschiedenen Ausgangsstoffen, Bereitstellungspfaden und Produktionsmengen – in Edel et al. 2019 werden Kraftstoffkosten zwischen 3,44 und 11,83 ct/kWh angegeben			
Durchschnittlicher Strompreis Wallbox/Ladesäulen [€/kWh]	0,194	0,212	0,246
- Eigene Annahmen Strompreise für verschiedene Ladeorte - Eigenen Annahmen Aufteilung auf Ladeorte in Anlehnung von Scherrer et al. 2019, Plötz et al. 2020, BMWi 2021 - Schließt Preisreduktion für Lastflexibilität ein, in Anlehnung an BMWi 2021 - In den Strompreisen sind für öffentliches und halböffentliches Laden die Ladesäulenkosten integriert, für Laden zu Hause werden die Wallboxkosten separat berechnet - Aufschlag für nur erneuerbaren Strom 2020 bis 2030 2 ct/kWh (anspruchsvoller Ökostromvertrag mit Daten aus UBA 2019b), danach Preisparität mit durchschnittlichem Strompreis (eigene Annahme, abgeleitet daraus, dass im unterstellten Stromszenario 2030 die erneuerbaren dominieren)			

3 Treibhausgasemissionen, Luftschadstoffe und kritische Rohstoffe

3.1 Grundlagen der Umweltbewertung

Eine etablierte Methode zur Analyse der Umweltauswirkungen von verschiedenen Technologien ist die ganzheitliche Umweltbewertung in Anlehnung an eine Ökobilanz nach ISO 14040/44. Mit dieser Methode werden alle Wirkungen vom Rohstoffabbau bis hin zu den Emissionen abgebildet und ihre Auswirkungen auf die Umwelt charakterisiert.

Ziel der in dieser Studie durchgeführten Umweltbewertung von Pkw mit verschiedenen Antrieben ist die Untersuchung der gesamten Prozesskette von der Fahrzeugherstellung über die Fahrzeugnutzung bis hin zur Entsorgung. Dabei wird auch die Bereitstellung des benötigten Stroms bzw. der Kraftstoffe mitbetrachtet. Dies ermöglicht es, Vergleiche zwischen den Umweltwirkungen der verschiedenen Antriebskonzepte bei ansonsten weitgehend gleichwertigen Fahrzeugen anzustellen.

Zentral ist dabei die Betrachtung der Klimawirkung (bzw. der Treibhausgasemissionen als GWP mit einem Zeithorizont von 100 Jahren) nach IPCC (2014). Um mögliche Verschiebungen in anderen Umweltwirkungskategorien aufzuzeigen, werden zudem auch die beiden wichtigsten Schadstoffemissionen im Straßenverkehr, der Feinstaub (bilanziert als PM₁₀ als alle Partikel kleiner 10 µm) sowie die Stickoxide (bilanziert als NO_x-Emissionen) untersucht.

3.2 Emissionen aus der Herstellung von Strom

3.2.1 Einleitung

Neben der Herstellung der Fahrzeuge ist insbesondere deren Nutzungsphase von hoher Relevanz für die Klimabilanz. Hier spielen neben den Verbrauchswerten der Fahrzeuge die spezifischen Emissionen in der Herstellung der Kraftstoffe eine Rolle, insbesondere für die Elektrizität, Wasserstoff und seine Derivate wie synthetisches Methan oder Methanol.

Auf der Basis der Auswertung von 44 LCA-Studien zu batterieelektrischen Fahrzeugen kommen Marmioli et al. (2018) zu dem Schluss, dass trotz des großen Detailumfangs und der zahlreichen Variablen die Intensität des Strommixes 70 % der Variabilität der Ergebnisse in den Studien zur LCA von batterieelektrischen Fahrzeugen erklärt. Übertragen lässt sich dies auf die anderen alternativen Kraftstoffe, die auf der Basis von Strom hergestellt werden können, wie Wasserstoff und Derivate von Wasserstoff. Bei diesen wirken sich durch die höheren Umwandlungsverluste gegenüber einer direkten Stromnutzung die angesetzten THG-Emissionen der Stromerzeugung sogar noch deutlich stärker auf das Ergebnis aus.

Im Folgenden werden zuerst die in der Literatur diskutierten Ansätze zur Bewertung von Treibhausgasemissionen aus dem Stromnetz vorgestellt und bewertet. Anschließend werden die verwendete Methodik und die Daten präsentiert.

3.2.2 Treibhausgasemissionen aus der Stromerzeugung – Diskussion verschiedener Ansätze

Bei der Ermittlung der THG-Emissionen des Kraftwerksparks tritt stromseitig ein Zuordnungsproblem zur nachgefragten Kilowattstunde (kWh) Strom auf. Wenn ein Barrel Erdöl eingekauft wird, kann die Emissionswirkung von Experten anhand seiner chemischen Eigenschaften eindeutig bestimmt werden. Bei einer Kilowattstunde Elektrizität gibt es jedoch keine physikalische oder chemische Analyse, die auf die Quelle schließen lässt. Das Stromnetz ist vergleichbar mit einem See, auf dem auf der einen Seite eine Reihe an Stromproduzenten Strom einleiten und auf der anderen Seite Strom entnommen wird.

Derzeit gibt es zwei wesentliche, unterschiedliche bilanzielle Ansätze zur Bewertung von Strom in LCA-Studien, die verwendet werden (siehe zur Studienübersicht Marmioli et al. 2018, in der 44 Studien seit 2008 ausgewertet wurden). Man kann entweder die jährlichen oder stündlichen Durchschnittsemissionen aus dem gesamten Kraftwerkspark ansetzen. Oder es kann das Kraftwerk mit den höchsten THG-Emissionen gewählt werden (entweder auch jährlich oder stündlich gesehen), den sogenannten Grenzstromansatz. Der argumentative Ansatz von den THG-Emissionen des Grenzstromkraftwerkes ist, dass strombasierte Pkw die Stromnachfrage erhöhen. Dazu wird dann üblicherweise mit den THG-Emissionen von fossilen Kraftwerken gerechnet, weil i.d.R. davon ausgegangen wird, dass die Erneuerbaren-Stromerzeugung begrenzt ist und keine zusätzlichen Erneuerbaren-Kraftwerke für strombasierte Pkw gebaut werden. Diese THG-Emissionen sind dann vergleichsweise hoch. Sie liegen für Deutschland um ca. den Faktor 2 über den durchschnittlichen THG-Emissionen des Stromixes (siehe Marmioli et al. 2018, Fattler 2021, Koch et al. 2021).

Marmioli et al. (2018) folgern in ihrer Studie zu dieser Thematik, dass der Ansatz mit Grenzstromemissionen zur Modellierung der kurzfristigen Auswirkungen der Einführung von Elektrofahrzeugen nützlich ist. Es ist aber nicht die richtige Methodik, um die politischen Entscheidungsträger zu informieren, da sie nur eine beschränkte Teilsicht bieten. Die Fokussierung auf kurzfristige Effekte ist nicht in der Lage, die dynamischen Änderungen über die Zeit zu berücksichtigen. Weiterhin äußern die Autoren einige Zweifel an der Methodik, mit der der kurzfristige Grenzstrom der einzelnen Stromsysteme in verschiedenen Studien berechnet wurde.

In Wietschel et al. (2019a) wird ausführlich auf die Diskussion der Verwendung von Grenzstromemissionen für batterieelektrische Fahrzeuge eingegangen. Die wesentlichen Gründe dafür, dass der Ansatz von Grenzstromemissionen für die vorliegende Zielrichtung der Studie nicht als geeignet eingestuft wird, werden im Folgenden aufgezeigt.

Grenzstromemissionen lassen sich nicht klar zuordnen: Bei Verwendung der Emissionen des Grenzkraftwerkes besteht eine Zuordnungsproblematik. Bisherige konventionelle Stromnachfrage, z. B. bei Beleuchtung und Weißen Waren, geht zurück, und eine Reihe an neuen Stromnachfragern kommt aus Anwendungen wie batterieelektrischen Fahrzeugen, Wärmepumpen, IKT-Anwendungen oder Strom für Niedertemperatur-Wärmenachfrage in der Industrie hinzu. Wer entscheidet, nach welchen Kriterien, welche der Anwendungen Grenznachfrager nach Strom sind und deshalb mit den Grenzemissionen zu belasten ist?⁴

⁴ Zu welchen Herausforderungen die Zuordnung führt, lässt sich an einer kritischen Betrachtung der Studie FVV (2021) zeigen. Dort wird mit Grenzstromemissionen für die Bewertung von Elektro-Pkw argumentiert. Zur Berechnung wird allerdings ein Kraftwerkssystem genommen, welches auch die Nachfrage von knapp 100 Mio.

Zeitliche Flexibilität beim Laden von batterieelektrischen Fahrzeugen oder der Herstellung von Wasserstoff verringert das Problem: Weiterhin ist zu festzuhalten, dass batterieelektrische Fahrzeuge sehr gut gesteuert beladen werden können (sie stehen zu 95 % ihrer Zeit, meistens in der Nähe von Lademöglichkeiten). Durch intelligentes Lademanagement, bei dem die Beladung von BEV (oder auch PHEV) in Zeiten mit günstigen Strompreisen verschoben wird, die i.d.R. mit einem hohen Anteil an erneuerbaren Energien korrelieren, kann die Treibhausgasbilanz verbessert werden. Die Simulationsrechnungen in Wietschel et al. (2019a) haben gezeigt, dass hierdurch die THG der BEV noch einmal um 4 bis 6 Prozentpunkte gesenkt werden können, wenn der Strommix unterstellt wird. Auch eine Vermeidung von einer Abregelung von Erneuerbaren in Zeiten, wo die Stromnachfrage unter dem Angebot liegt, kann hierdurch zumindest teilweise vermieden werden (siehe Dallinger et al. 2012 oder Wulf et al. 2020). Wenn ein sogenanntes bidirektionales Laden unterstellt wird, bei dem die Fahrzeugbatterien gleichzeitig als stationäre Stromspeicher dienen, dann können sich künftig nach Fattler (2021) sogar negative THG-Emissionen bei der Stromnutzung.

Derartige Angebote existieren heute, sind aber noch nicht sehr verbreitet. BEV-Nutzer äußerten in einer Befragung eine recht hohe Bereitschaft zur Teilnahme an solchen Angeboten (siehe Scherrer et al. 2019). Aktuell geplante bzw. schon umgesetzte Gesetzesvorhaben wie die Förderung von Wallboxen in Verbindung mit Lastmanagement und einem Ökostromvertrag, die Förderung von stationären Speichern für Hausanwendungen, die geplante Spitzenlastglättung für batterieelektrische Fahrzeuge oder die Einführung zeitvariabler Stromtarife zielen darauf ab. Als flexible Lasten können batterieelektrische Fahrzeuge gut zur Systemintegration von Erneuerbaren-Stromerzeugern beitragen und unterstützen somit den Ausstieg aus der fossilen Stromproduktion.

Lastmanagement spielt auch bei der Herstellung von Wasserstoff und daraus abgeleiteten Derivaten eine Rolle. Die Kosten der Herstellung von Wasserstoff werden neben den CO₂-Kosten wesentlich durch die Investitionen in die Anlagen sowie dem Strompreis determiniert (siehe Michaelis et al. 2018, Wietschel et al. 2019b). Der Strompreis wiederum ist starken Schwankungen unterworfen, u. a. abhängig davon, wie viele Stromerzeuger gerade Erneuerbare einspeisen und wie hoch die Stromnachfrage ist. Es existieren einige Stunden mit niedrigen (oder sogar negativen Strompreisen), aber auch einige Stunden mit sehr hohen Strompreisen. Heute und in den nächsten Jahren ergibt sich hieraus eine optimale Anzahl von Volllaststunden der Elektrolyse von 4.000 bis 6.000 Stunden (siehe Michaelis et al. 2018, Wietschel et al. 2019b, Drünert et al. 2019). In Wietschel et al. (2019a) wird für 2030 gezeigt, dass die durchschnittlichen CO₂-Emissionen des Strommixes in Stunden, in denen Elektrolyseure zum Einsatz kommen, um rund 16 % unterhalb der Durchschnittsemissionen des Strommixes liegen können.

Strom für E-Autos wird beim Erneuerbaren-Ausbau eingeplant: Wegen der zeitlichen Flexibilität beim Laden ist für E-Autos nicht die unmittelbare Änderung des Strommixes relevant, sondern die längerfristige Entwicklung des Erzeugungsmixes. Da der zusätzliche Strombedarf durch die E-Autos bei der Planung des Ausbaus der erneuerbaren Stromerzeugung berücksichtigt wird, ist es gerechtfertigt, davon auszugehen, dass keine zusätzliche fossile Stromerzeugung erfolgt und für alle Stromverbraucher inkl. E-Autos der Strommix zu unterstellen ist.

Elektro-Pkw in der EU im Jahr 2030 deckt. Dann wird die Nachfrage eines weiteren Elektro-Pkw mit Grenzemissionen modelliert. Was lässt sich aber aus diesen Ergebnissen für die knapp 100 Mio. anderen bereits im System berücksichtigten Elektro-Pkw schließen?

Europäischer Stromhandel begrenzt die THG-Emissionen aus der Stromerzeugung: Es lässt sich auch argumentieren, dass durch den europäischen Emissionshandel die Treibhausgasemissionen aus der Stromerzeugung längerfristig gedeckelt sind und eine zusätzliche Stromnachfrage damit nicht zu höheren Treibhausgasemissionen führt. Allerdings vermischt sich bei dieser Argumentation die Bewertung einer Maßnahme mit einem Instrument der Klimapolitik.

Energiepolitische Realitäten sind einzubeziehen: Rein theoretisch wäre es aus einer rein auf THG-Emissionen und -kosten bezogenen Minderungsstrategie richtig, zuerst alle Kohlkraftwerke abzuschalten und durch Erneuerbare zu ersetzen – und dann erst auf batterieelektrische Fahrzeuge oder Wärmepumpen zu setzen. Allerdings muss man in der Energiepolitik verschiedene Ziele verfolgen, Aspekte wie Versorgungssicherheit, Strompreise oder Strukturwandel in den Kohleregionen sind zu beachten. Dies führt dazu, dass erst langsam aus der Kohle ausgestiegen wird. Wenn man aber mit anderen Maßnahmen wie Elektromobilität oder Großwärmepumpen in Wärmenetzen noch wartet, bis das letzte Kohlekraftwerk abgeschaltet ist (nach aktueller Planung 2038), dann wird man die bestehenden politischen Klimaziele sehr deutlich verfehlen.

Grenzemissionen fossiler Energien sollte man dann ebenfalls einbeziehen: Wenn man den Ansatz der Grenzemissionen verfolgt, so muss man ihn dann konsequenterweise auch auf Erdöl anwenden – Erdöl ist ein Weltmarktprodukt. Die Grenzemissionen kommen dann aus Ölsanden aus Kanada oder Venezuela oder Öl-Fracking aus den USA – und diese sind in der Gewinnung ca. fünfmal höher als bei dem konventionellen Erdöl (siehe Wietschel et al. 2019a). Eine gute Klimabilanz erreicht man dann mit der in IASTEC (2021) vorgeschlagenen Mischung von konventionellem Benzin bzw. Diesel mit eFuels nicht.

Die Diskussion betrifft alle strombasierten Kraftstoffe: Die Diskussion ist nicht nur auf batterieelektrische Fahrzeuge beschränkt, sondern bezieht sich auch auf Wasserstoff und Wasserstoff-Derivate wie synthetisches Methan oder flüssige synthetische Kraftstoffe. Diese sind von der Grenzstromproblematik noch stärker betroffen, da diese pro gefahrenen Pkw-Kilometer einen fünffach höheren Stromverbrauch (synthetische Kraftstoffe) oder zwei- bis zweieinhalbfach höheren Stromverbrauch (Wasserstoff) haben, ist ihre Klimabilanz dann in den nächsten Jahren auf dieser Basis des Grenzstromansatzes schlecht. Teilweise wird argumentiert, dass synthetische Kraftstoffe auf der Grundlage von erneuerbarem Strom hergestellt werden und damit besser in der Klimabilanz sind als batterieelektrische Fahrzeuge, die mit Grenzstromemissionen bewertet werden (siehe IASTEC 2021, FVV 2021⁵). Diese Argumentation setzt allerdings voraus, dass man das Stromsystem trennen kann. Für synthetische, strombasierte Kraftstoffe (eFuels) kann man nach dieser Argumentation die Erneuerbaren ausbauen (mit einem viel höheren Strombedarf gegenüber einer direkten Verwendung des Stroms in batterieelektrischen Fahrzeugen), während man dies für E-Pkw angeblich nicht kann⁶. Diese Argumentation erscheint in sich nicht schlüssig zu sein, selbst wenn argumentiert wird, dass eFuels ja aus dem Ausland aus wind- und sonnenreichen Regionen bezogen werden können. Auch im Ausland sind dann die Treibhausgasemissionen des Grenzstroms anzusetzen. Und viele der aktuell diskutierten Länder für eine Produktion und Export von grünem Wasserstoff und Derivaten wie Marokko oder

⁵ In FVV (2021) wird einmal argumentiert, dass der Stromerzeugungsmix in Deutschland stark vorgezeichnet ist, sodass nur begrenzt technische Optionen verbleiben, um eine zusätzliche Nachfrage zu decken. Deshalb sollten E-Pkw mit Grenzemissionen bewertet werden. An einer anderen Stelle wird aber bei den strombasierten synthetischen Kraftstoffen davon ausgegangen, dass diese aus zusätzlichen Erneuerbaren hergestellt werden können.

⁶ Dies wird teilweise mit bestehenden gesetzlichen Regularien begründet. Auf diese Diskussion wird später eingegangen.

Australien haben einen Kohlestromanteil von mehr als 50 % (und höhere THG-Emissionen aus der Stromproduktion im Vergleich zu Deutschland). Nur wenige Länder wie Island oder Norwegen kämen dann noch auf eine gute Treibhausgasbilanz für eFuels. Allerdings braucht es noch viele Jahre, bis hier nennenswerte Produktionskapazitäten für eFuels aufgebaut werden. Nach IEA wurden weltweit 2019 nur 19 MW an Elektrolyseurleistung installiert (siehe IEA 2021). Allein für den Ausbau an Elektrolyseleistung nach der deutschen nationalen Wasserstoffstrategie bräuchte man für die Nachfragemengen von Deutschland rund 15 GW, davon sollen 5 GW in Deutschland installiert werden. In der EU-Wasserstoffstrategie (EC 2020b) wird eine Zielmarke von 80 GW Elektrolyseleistung für die EU sowie für Lieferländer von Wasserstoff an die EU genannt. Erst nach 2025 sind allerdings überhaupt erste erwähnenswerte Mengen zu erwarten – zu spät um einen größeren Beitrag zur THG-Zielerreichung in Deutschland nach der Novelle des KSG für 2030 erreichen zu können. Dies, zumal der Wasserstoff und seine Derivate in anderen Bereichen, insbesondere der Industrie (Eisen- und Stahlindustrie, Chemische Grundstoffindustrie) und im internationalen Flug- und Schiffsverkehr, dringender benötigt werden, weil hier Alternativen fehlen (siehe Wietschel et al. 2021 sowie Nationaler Wasserstoffrat 2021). Die Problematik, dass grüner Wasserstoff und seine Derivate knapp und teuer sind und deshalb eher nicht im Pkw-Verkehr eingesetzt werden sollten, sondern in anderen Bereichen, wird ausführlich in (SRU 2021) dargelegt.

Eine Argumentationslinie könnte dann darin bestehen, zu sagen, wer für die erneuerbare Stromproduktion zahlt – z. B. die Erneuerbaren-Anlagen im Ausland zur Produktion von grünem Wasserstoff und Derivaten – dem ist dann dieser Strom zu zurechnen. Allerdings lässt sich so auch die Argumentation auf E-Pkw anwenden. Überdurchschnittlich viele Personen mit E-Pkw haben eine eigene Photovoltaikanlage sowie einen stationären Stromspeicher und/oder einen Ökostromvertrag (siehe Wietschel 2019a).

Wendet man die Regeln der EU-Taxonomie für grünen Wasserstoff sowie die Anforderungen an zugelassene Kraftstoffe im Sinne der RED II für RFNBO an, so gilt die Vorgabe von 70 % niedrigerer CO₂-Intensität einer fossilen Referenz in Höhe von 94 gCO₂äq/MJ Otto Kraftstoff (bzw. 95,1 gCO₂äq/MJ bei Dieselmotorkraftstoffen). In der RED II sind weiterhin zusätzliche Regeln aufgeführt:

- Additionalität (Zusätzlichkeit der EE-Stromerzeugung);
- Zeitliche Korrelation (zwischen EE-Einspeisung und Elektrolyseurbetrieb);
- Geographische Korrelation (zwischen EE-Einspeisung und Elektrolyseurbetrieb).

In einem Delegated Act muss die EU-Kommission noch die genaue Ausgestaltung festlegen. Die Klimabilanz von Wasserstoff und seinen Derivaten hängt von der Ausgestaltung ab. Wenn es möglich sein sollte, die Zusätzlichkeit über bestehende Anlagen, die vorher über das EEG gefördert wurden und dann nun aus der EEG-Förderung herausgenommen werden, um über Herkunftsnachweise bilanziell dem Wasserstoff und seinen Derivaten zugeschlagen zu werden, ist dies aus ökologischer Sicht eher kritisch zu sehen.

Weiterhin ist zu diskutieren, ob es eine Zusätzlichkeit von Stromproduktion aus Erneuerbaren, die man einzelnen Nachfragern zuordnen und zurechnen kann, überhaupt geben kann. Legt man ein sehr ambitioniertes Szenario für die Dekarbonisierung des Stromsektors zugrunde, so kann es eine Zusätzlichkeit über die bisherigen Ausbaupfade hinaus eigentlich gar nicht geben, da der Klimaschutz es erforderlich macht, dass der Ausbau der erneuerbaren Energien in vollem Umfang schnellstmöglich umgesetzt werden muss (siehe die Diskussion in Agora 2021).

3.2.3 Treibhausgasemissionen aus der Stromerzeugung – Angenommene Werte

Beim gewählten methodischen Ansatz werden bestehende Politikinstrumente zur ökologischen Steuerung von alternativen Kraftstoffen und Antrieben nicht berücksichtigt, da sie die Bewertung deutlich verzerren. Wie im vorangegangenen Kapitel ausführlich behandelt, ist es heute üblich, bei der Politikberatung die durchschnittlichen Treibhausgasemissionen vom Strommix anzusetzen (siehe z. B. Helms et al. 2016, Jochem et al. 2015, Moro et al. 2018, ADAC 2018; Agora Verkehrswende 2019a; EC 2020a sowie Marmioli et al. 2018). In einigen Studien wird allerdings der aktuelle Wert verwendet und für die Zukunft konstant gehalten (siehe beispielsweise Helms et al. 2016, ADAC 2018, Marmioli et al. (2018)⁷). Jedoch haben sich die Treibhausgasemissionen aus der Stromerzeugung in den letzten Jahren kontinuierlich gesenkt (siehe UBA 2021a)⁸: Aufgrund der aktuellen politischen Zielsetzung in Deutschland mit der Novelle des Klimaschutzgesetzes (KSG) und in der EU mit dem Maßnahmenpaket „Fit for 55“ der Kommission ist die Zielsetzung für eine weitere drastische Reduzierung der THG-Emissionen aus der Stromerzeugung als politisches Ziel gesetzt, und entsprechende Gesetze wurden und werden auf dem Weg gebracht. Verschiedene Studien zeigen hierfür auch passende Umsetzungspfade auf (siehe u. a. Agora 2020 und BMWi 2021).

In dieser Studie wird als Startjahr für die Treibhausgasemissionen aus der Stromerzeugung das Jahr 2019 gewählt. Für 2020 liegen erste vorläufige Werte vor. 2020 ist ein untypisches Jahr, weil durch die Corona-Krise die Wirtschaftsleistung eingebrochen ist und damit auch die Stromnachfrage gesunken ist.

Nach UBA (2021) betrugen die THG-Emissionsfaktoren für den Stromverbrauch im deutschen Strommix mit Berücksichtigung der Vorkette⁹ im Jahr 2019 470 g/kWh. Auf vergleichbare Werte kommt auch Fattler (2021).

Für die Jahre 2030, 2040 und 2050 wird auf das Treibhausgasneutrale (TN) Szenario Strom der Studie BMWi 2021 (Langfristszenarien für die Transformation des Energiesystems in Deutschland 2021 (LFS III)) zurückgegriffen, weil dieses für 2030 und 2040 die aktuellen Ziele der Novelle des Klimaschutzgesetzes einhält. Weiterhin liegt ein kompletter Rückgriff auf alle Daten der Studie vor. Das Szenario Strom ist dadurch charakterisiert, dass es auf eine starke Nutzung von erneuerbarem Strom setzt. Die dort eingesetzten Modelle der Energienachfrage errechnen jeweils für ihren Sektor Szenarien mit starker Stromnutzung. Allerdings wird für das Ziel der Treibhausgasneutralität in diesem Szenario auch eine erhebliche Menge Wasserstoff benötigt. Die Deckung der Nachfrage nach Strom, Wärme in Wärmenetzen und Wasserstoff wird optimiert. Dabei werden die Kosten der Netze für Strom und Gas bzw. Wasserstoff berücksichtigt.

⁷ Manche Studien unterstellen veraltete und damit überhöhte Werte, wie in ADAC (2018) oder VDI (2020) geschehen. Dies ist ein wesentlicher Grund, warum in diesen Studien die Elektromobilität im Vergleich zu anderen Studien schlechter bewertet wird.

⁸ Setzt man jedoch die heutigen Treibhausgasemissionen als konstant für die künftigen Jahre an, dann liegt ein heute angeschafftes Elektrofahrzeug bzw. FCEV in seiner THG-Bilanz gegenüber konventionellen Fahrzeugen etwas unter oder in einer ähnlichen Größenordnung bzw. schneidet je nach Annahmen sogar schlechter ab.

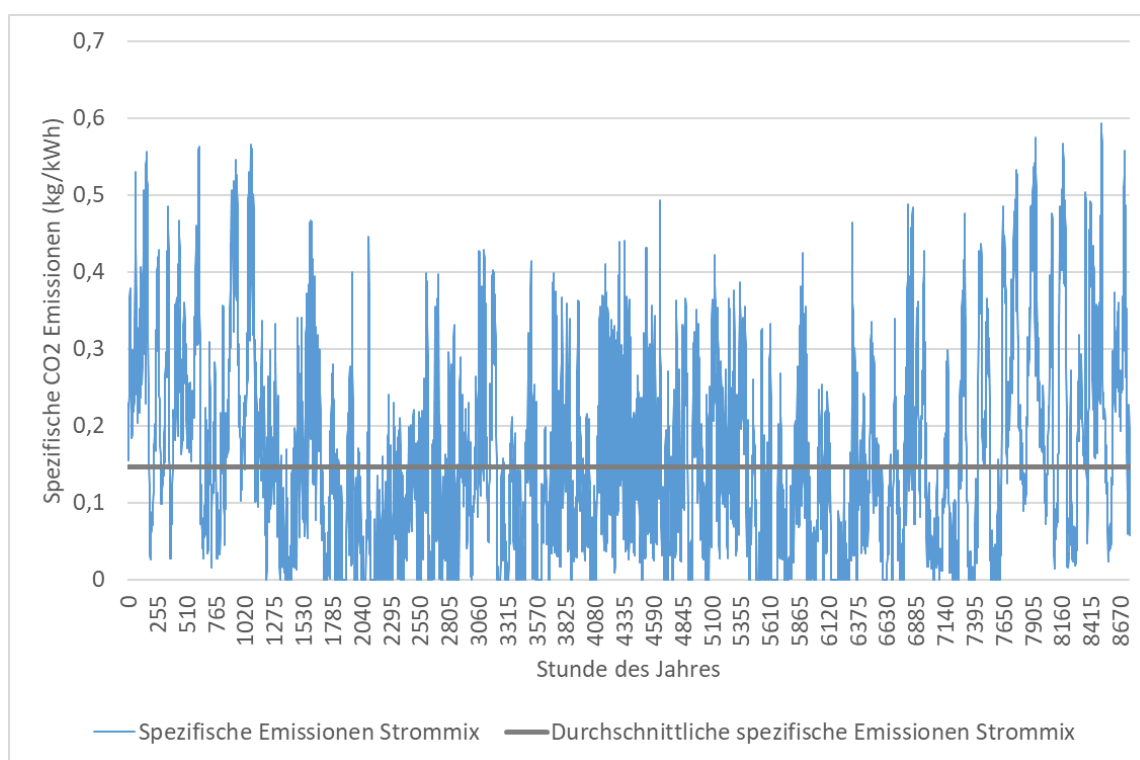
⁹ Hierzu zählen Emissionen, die außerhalb der Umwandlungsprozesse in den sog. Vorketten entstehen, wie z. B. bei der Herstellung von Anlagen zur Energieumwandlung oder der Gewinnung und Bereitstellung von Primär- und Sekundärenergieträgern.

Die Nutzung von Kohlenwasserstoffen wird bis 2050 auf das nachhaltige Potenzial von Biomasse begrenzt. Ausführliche Informationen zur Methodik, Daten und Ergebnissen zu dem Szenario finden sich in BMWi 2021.

In dem Szenario Strom der Langfristszenarien wird die höhere Stromnachfrage durch alternative Antriebe und Kraftstoffe berücksichtigt. Somit wird der teilweise geäußerten Kritik, dass in der Berechnung der durchschnittlichen Treibhausgasemission des Strommixes die zusätzliche Nachfrage nicht enthalten sei, Rechnung getragen. Dies ist ein heute in den Energiesystemanalysen zur künftigen Ausgestaltung des Energiesystems üblicher Ansatz. Allerdings muss vorab festgelegt werden, welche Stromnachfragemenge sich aus den alternativen Antrieben und Kraftstoffen ergibt.

Für das Jahr 2030 ergibt sich ein $\text{CO}_{2\text{äq}}$ -Emissionswert aus der Nettostromerzeugung von 146 g/kWh und für 2040 von Netto 38 g/kWh. In der Abbildung 1 sind die jährlichen und die stündlichen CO_2 -Emissionen für 2030 dargestellt.

Abbildung 1: Szenario der spezifischen CO_2 -Emissionen des Kraftwerksmix in Deutschland für 2030 (eigene Daten für das Szenario TN-Strom aus der Studie BMWi 2021)



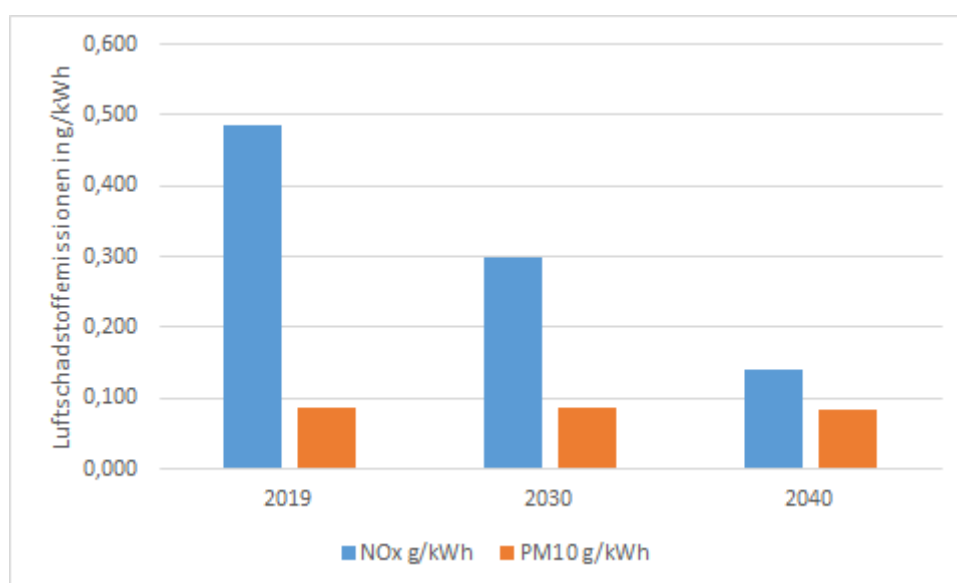
Um auf die Treibhausgasemissionen des inländischen Stromverbrauchs zu kommen, werden eigene Annahmen getroffen. Diese betreffen u. a. 6 % Leitungsverluste (UBA 2018) und 30 g/kWh Vorkettenbelastung für die Erzeugung von fossilem Strom auf der Basis einer eigenen groben Abschätzung nach Zahlen aus FfE (2017). Für die Zwischenjahre wird interpoliert. Auch bei der Herstellung von Erneuerbaren-Anlagen fallen Treibhausgasemissionen an. Diese Werte nach Wietschel et al. (2019a) in 2020 mit 30 g/kWh und in 20230 mit 20 g/kWh angesetzt.

Für das Jahr 2020 werden dann in der Summe ein $\text{CO}_{2\text{äq}}$ -Emissionswert von 470 g/kWh für die Nutzung von Strom auf Verteilnetzebene angesetzt, der in 2030 auf 185 g/kWh sinkt.

3.2.4 Feinstaub- und Stickoxidemissionen aus der Stromerzeugung

Bei den Luftschadstoffen sind die indirekten und direkten Emissionen aus der Stromerzeugung zu beachten. Diese werden auf der Basis des heutigen Kraftwerkmixes sowie des Kraftwerkmixes aus dem TN-Strom-Szenario der Langfristszenarien (siehe BMWI 2021) und den Emissionen der unterschiedlichen Stromerzeugungstechnologien aus der ecoinvent-Datenbank berechnet. Abbildung 2 zeigt die Ergebnisse.

Abbildung 2: Direkte und indirekte Luftschadstoffemissionen durch die Strombereitstellung



Es zeigt sich, dass es bei den Stickoxidemissionen zu deutlichen Verbesserungen kommt, während die Pm10-Emissionen trotz der Umstellung auf höhere Anteile erneuerbarer Energien konstant bleiben. Dies ist insbesondere auf den Einfluss der Herstellung der Stromerzeugungsanlagen zurückzuführen.

3.3 Emissionen aus der Herstellung von Kraftstoffen

3.3.1 Treibhausgasemissionen aus der Herstellung fossiler Kraftstoffe und Biokraftstoffe

Treibhausgasemissionen und Luftschadstoffemissionen aus der Bereitstellung von fossilen Kraftstoffen (Diesel, Benzin sowie CNG) sowie die Treibhausgasemissionen aus der Verbrennung dieser Kraftstoffe werden aus TREMOD (ifeu 2020) entnommen.

Nach ifeu (2020) beträgt der aktuelle Biodieselanteil 7,7 % (energetisch) in 2020, stagniert jedoch bis 2030 bei 7,4 %. Bioethanol hat aktuell (2020) einen Anteil von lediglich 4,4 % (energetisch), in Zukunft soll sich dieser Anteil nach TREMOD auf 7,3 % bis 2030 erhöhen und dann stabil bleiben. Damit sind die Potenziale für den Einsatz von Biokraftstoffen im Verkehr eher beschränkt. Dies liegt vor allem an der aktuellen Verschärfung der Gesetzgebung zur Renewable Energy Directive II (RED II), da diese den Einsatz von Palmöl sukzessive einschränkt (bzw.

komplett verbietet) und auch den Einsatz von anderen anbaubasierten Biokraftstoffen mit hohem Risiko für indirekte Landnutzungsänderungen sowie von Altspeisefetten beschränkt. Fortschrittliche, auf nachhaltigen Reststoffen basierende Biokraftstoffe stehen jedoch weder aktuell noch in Zukunft in größeren Mengen zur Verfügung. Da die Beimischung von Biokraftstoffen eine Maßnahme zur THG-Minderung ist, wird diese nicht bei der Berechnung der ökologischen und wirtschaftlichen Analysen betrachtet. Es wird dafür separat ein hundertprozentiger Biogaseinsatz in einem Gasfahrzeug analysiert. Da weiterhin die Beimischungsquoten gering sind und auch Biokraftstoffe THG-Emissionen in der Herstellung ausweisen, ist der Einfluss der Beimischung auf die Klimabilanz von konventionellen Fahrzeugen gering.

Tabelle 4: Vorkettenemissionen und direkte Emissionen fossiler Kraftstoffe

		kg CO ₂ äq./l
2020	Benziner	2,92
	Diesel	3,23
2030	Benziner	2,88
	Diesel	3,24

Einen Sonderfall stellt der Einsatz von Biomethan als Kraftstoff für CNG-Fahrzeuge dar. In Deutschland liegt insgesamt der Anteil an Biogas bei unter einem Prozent bezogen auf die gesamte Erdgasmenge (Agora Verkehrswende 2019a). Da CNG-Tankstellen sich üblicherweise aus dem Erdgasnetz speisen, liegt der physische Biomethananteil, den diese Fahrzeuge nutzen, ebenfalls unter einem Prozent. Dennoch bekommt der Verkehrsbereich in der Energiebilanz höhere Anteile Biomethan zugerechnet. Zwei Gründe sprechen jedoch bei der Ökobilanzierung gegen dieses Vorgehen: Zum einen sind diese hohen Anteile von bis zu 30 % Biomethan nur zu erreichen, weil es insgesamt in Deutschland aktuell nur wenige Erdgasfahrzeuge gibt und damit die begrenzten Biogaspotenziale nicht limitierend wirken. Zum anderen wird so eine bessere Vergleichbarkeit der Fahrzeuge untereinander hergestellt, da Strom für die Elektro-Pkw auch mit dem Landesmix gerechnet wird, also kein Bezug von Ökostrom o. ä. berücksichtigt wird (siehe auch Agora Verkehrswende 2019a).

Es wird aber separat ein hundertprozentiger Biogaseinsatz in einem Gasfahrzeug analysiert, um mögliche Auswirkungen auf Kosten und Klimabilanz darzustellen.

3.3.2 Treibhausgasemissionen aus der Herstellung von synthetischen strombasierten Kraftstoffen

Die Umwandlung von Strom in synthetische Kraftstoffe wird als Power-to-X (PtX) bezeichnet. Unter Power-to-Gas (PtG) versteht man die Herstellung eines gasförmigen Zielproduktes, wie Wasserstoff (H₂) oder Methan (CH₄) und unter Power-to-Liquid (PtL) die Herstellung eines flüssigen Energieträgers, wie Otto- oder Dieselmotorkraftstoff, Kerosin oder auch Ethanol. Diese Art der Kraftstoffe wird oft auch als synthetische Kraftstoffe oder eFuels („e“ steht dabei für Elektrizität) bezeichnet. Der Einsatz von PtX-Technologien in einem relevanten Maßstab bedingt einen erheblichen Ausbau von EE-Stromerzeugung (die Herstellung von einer Million Tonnen Dieselmotorkraftstoff benötigt ca. 30 TWh Strom im Vergleich zu einem Nettostromverbrauch in Deutschland 2018 von 527 TWh; siehe Ausfelder et al. 2018). Darüber hinaus werden bedeutende Mengen (Süß-)Wasser und eine CO₂-Quelle benötigt.

Ein derzeit diskutierter Prozess dabei ist die Herstellung von synthetischem Methan. Hier wird üblicherweise die Wasserelektrolyse eingesetzt, die Wasser unter Zuführung von elektrischem Strom in Wasserstoff (H_2) und Sauerstoff (O_2) spaltet. Danach wird aus Wasserstoff und CO_2 üblicherweise im sogenannten Sabatier-Prozess synthetisches Methan hergestellt.

Zur Herstellung von flüssigen synthetischen Kraftstoffen wird Wasserstoff dann mit CO oder CO_2 zu flüssigen Kohlenwasserstoffen synthetisiert. Ein Weg führt über die Methanolsynthese und eine anschließende mehrstufige Konversion. Ein weiter weit verbreitetes Verfahren zur Herstellung flüssiger Kraftstoffe ist die Fischer-Tropsch-Synthese (FTS).

In dieser Studie wird der Fall untersucht, synthetische Flüssigkraftstoffe in Verbrennungsmotoren einzusetzen. Zur Berechnung der Treibhausgasemissionen für die Herstellung von synthetischen Flüssigkraftstoffen werden die Methanolsynthese mit den Wirkungsgraden aus der Tabelle 5 unterstellt.

Tabelle 5: Wirkungsgrade bei der Herstellung von synthetischem Methan

Parameter	2020	2030
Elektrolyse [%]	68	69
- Prognos 2020 - Hinzu kommen noch Emissionen durch Verdichtung und Transport sowie Anlagenherstellung. Hierfür wurden die Werte aus Sternberg et al. 2019 genommen		
Methanolsynthese [%]	83	83
Eigene Annahmen auf Basis einer Literaturrecherche		

Die Kosten der Herstellung von synthetischen Kraftstoffen werden neben den CO_2 -Kosten wesentlich durch die Investitionen in die Anlagen sowie dem Strompreis determiniert (siehe Michaelis et al. 2018, Wietschel et al. 2019b). Der Strompreis wiederum ist starken Schwankungen unterworfen, u. a. abhängig davon, wie viele erneuerbare Energien gerade eingespeist werden und wie hoch die Stromnachfrage ist.

3.3.3 Treibhausgasemissionen aus der Herstellung von Wasserstoff

Für die Herstellung von Wasserstoff werden die durchschnittlichen THG-Emissionen des Kraftwerksparks angesetzt. Die unterstellten Wirkungsgrade des Elektrolyseurs finden sich im voranstehenden Kapitel.

Heute wird Wasserstoff überwiegend über die Dampfreformierung von Erdgas hergestellt. Diese ist oftmals die wirtschaftlichste Option. Allerdings sind die THG-Emissionen sehr hoch, und es werden hierdurch gegenüber den konventionellen Pkw keine THG-Einsparungen erzielt (siehe Wietschel et al. 2019c). Deshalb wird ein derartiger Pfad nicht untersucht.

3.4 Emissionen aus der Fahrzeugproduktion und -Entsorgung

Modellierung der Pkw-Herstellung und -Entsorgung

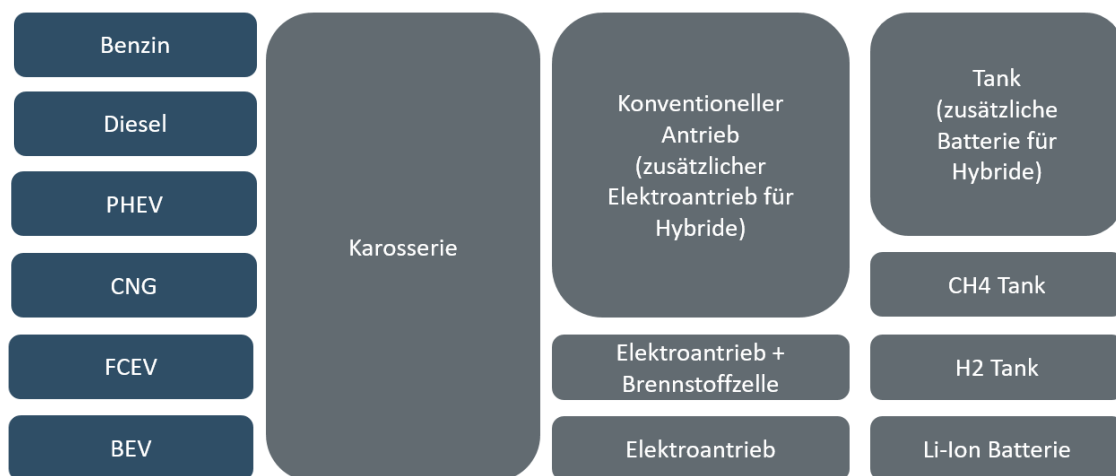
Für die Modellierung der Fahrzeugproduktion und -entsorgung wird das am ifeu entwickelte und laufend aktualisierte Ökobilanzmodell eLCAr genutzt. Das Modell erfasst die Umweltaus-

wirkungen von generischen Personenkraftwagen mit konventionellen und alternativen Antrieben über den gesamten Lebenszyklus. Für die Fahrzeugherstellung werden verschiedene Komponenten wie Karosserie, Antriebsstrang, Batterie und andere antriebsstrangspezifische Zusatzkomponenten unterschieden. Aufgrund der großen Bedeutung der Europäischen Union als Automobilproduktionsstandort wird eine Fahrzeugproduktion in der EU angenommen. Die Materialien für die Fahrzeugherstellung (z. B. Stahl oder Aluminium) sowie bestimmte Fahrzeugteile (z. B. Batterien) werden jedoch entsprechend der weltweiten Herkunftsländer berücksichtigt. Diese Hintergrunddaten für die Bereitstellung von Rohstoffen und Energie stammen aus der ecoinvent-Datenbank (Version 3.6), die für End-of-Life-Prozesse einen Cut-off-Ansatz verwendet. Das bedeutet, dass für alle verwendeten Primärmaterialien die vollen Umweltbelastungen berücksichtigt werden, während die verwendeten Sekundärmaterialien ohne Umweltlasten zur Verfügung gestellt werden. Am Lebensende werden dann die Belastungen aus der Abfallbehandlung bilanziert und keine Gutschriften für zurückgewonnene Sekundärmaterialien erteilt. Weitere Informationen zum eLCA-Modell für Pkw sind zu finden in Agora (2019a und 2019b).

Tabelle 6: Materialrelevante Pkw-Eigenschaften 2020 und 2030 in Anlehnung an BIT et al. 2021 sowie eigenen Berechnungen

	2020				2030		
	Lgw. (kg)	Motor (kW)	Tank (kg)	Akku (kWh)	Motor (kW)	Tank (kg)	Akku (kWh)
Benzin	1.350	100			100 + 67 el.		1,3
Diesel	1.460	100			100 + 67 el.		1,3
CNG	1.20	100	17,3		100	17,3	
PHEV	1.630	106 + 72 el.		13,4	106 + 72 el.		21,6
BEV	1.650	130		55,0	130		69,0
FCEV	1.850	115	5,8	1,3	115	5,8	1,3

Das ifeu-Modell folgt einem modularen Ansatz und ermöglicht die Skalierung aller relevanten Fahrzeugteile entsprechend ihrer technischen Eigenschaften. Die Dimensionierung erfolgt nach dem Leergewicht des Fahrzeugs, der Motorleistung(en), der Brennstoffzellenleistung und der Tank- bzw. Batteriegröße (siehe Tabelle 6).

Abbildung 3: Modularer Aufbau des eLCAR-Modells für die Pkw-Herstellung

Auch die Entsorgung der Fahrzeuge wird berücksichtigt. Diese erfolgt in der Regel in mehreren Schritten: Zunächst wird das Fahrzeug von Hand in verschiedene Teile zerlegt und die Reifen, Starterbatterien, Mineralölrreste und Glas werden getrennt und entsorgt. Anschließend wird das restliche Fahrzeug in einem Shredder zerlegt. Aus dieser Schredderfraktion können verschiedene Materialien für das Recycling abgetrennt werden. Dabei handelt es sich vor allem um Stahl und Eisen sowie Aluminium und Kupfer. Darüber hinaus wird die Kunststofffraktion abgetrennt und entsorgt. Übrig bleiben die Shredderrückstände, die meist verbrannt werden. Für die Entsorgung der verschiedenen Abfallfraktionen wurden Datensätze aus ecoinvent verwendet. Die Abfallmengen der Fraktionen ergeben sich aus der spezifischen Materialzusammensetzung der Fahrzeuge.

Modellierung der Batterieherstellung

Die Fahrzeugbatterie ist eine zentrale Komponente aller Fahrzeuge mit alternativen Antrieben und wichtigstes zu differenzierendes Bauteil. Derzeit dominieren Nickel-Mangan-Kobalt-Lithium-Ionen-Batterien (NMC) den europäischen Pkw-Markt. In den letzten Jahren hat sich die Lithium-Ionen-Batterietechnologie sehr schnell weiterentwickelt, was zu einer höheren Energiedichte, einem geringeren Energiebedarf bei der Herstellung und Änderungen in der Batteriechemie (z. B. geringere Mengen an Kobalt in der Zelle) führte. Tabelle 7 zeigt die Werte der Energiedichte zusammen mit der Zellchemie.

Tabelle 7: Eigenschaften der Fahrzeugbatterien (2020 und 2030)

	2020	2030
Zellchemie	NMC 622	NMC 811
Energiedichte (System)	150 Wh/ kg	200 Wh/kg

Jede Fahrzeugbatterie besteht aus mehreren Bestandteilen: Batteriezelle, Kühlung, Batteriemanagementsystem sowie Gehäuse. Das ifeu-Modell stützt sich bei der Batteriemodellierung hauptsächlich auf Ellingsen et al. (2014). Die Batteriezellenfertigung wurde jedoch aktualisiert anhand der Daten aus der GREET-Datenbank. Die Bereitstellung von Nickel-Mangan-Kobalt-Aktivmaterial stammt aus Dai et al. (2019) und die Bereitstellung von CoSO₄ (Kobaltsulfat) aus

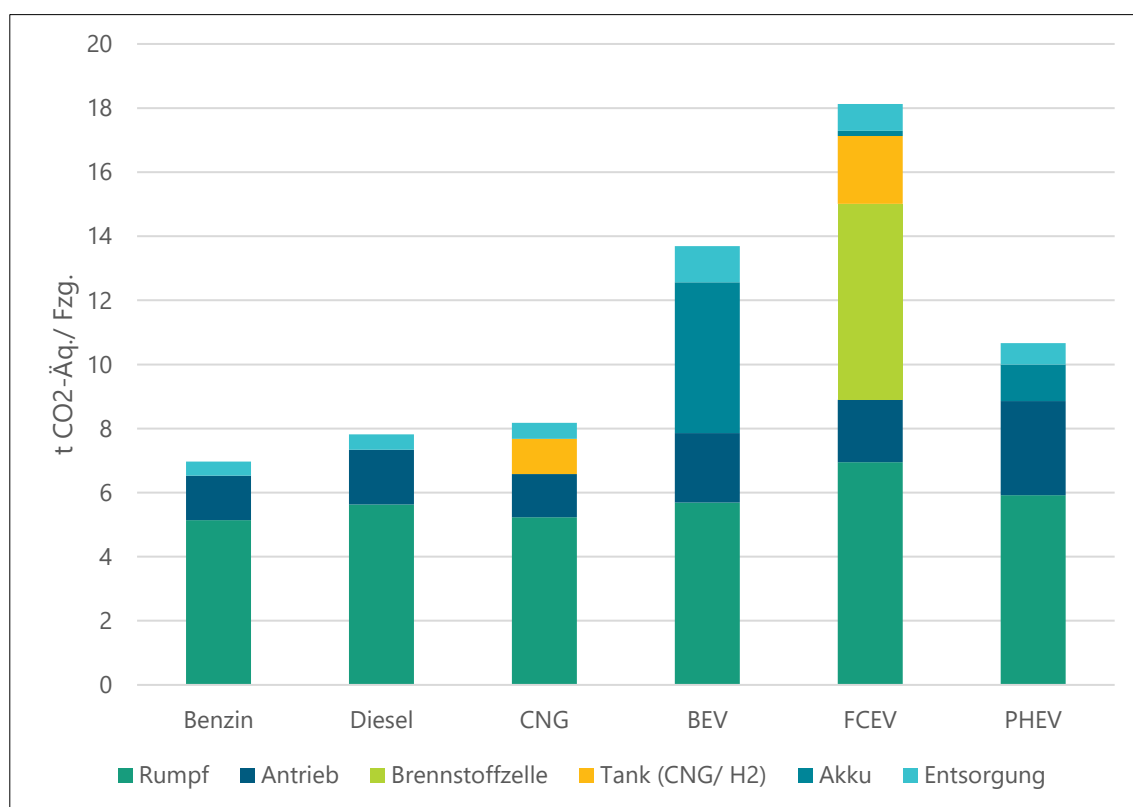
Dai et al. (2017). Für den Energiebedarf der Zellherstellung wird die Energie in Wärme und Strom aufgeteilt und die Werte aus Dai et al. (2017) verwendet.

Die Batteriezelle ist einer der Hauptfaktoren für die Umweltauswirkungen der Batterieherstellung, da sie große Mengen an Energie (Strom und Wärme) benötigt. China, Korea, Japan und die USA sind derzeit die größten Zellproduktionsländer und werden für die Bilanzierung für 2020 angesetzt; es gibt jedoch laufende Bemühungen, die Zellproduktion bis 2030 nach Europa zu verlagern. Daher wird für die Zellfertigung 2030 ein europäischer Energiemix verwendet. Der Aufwand für das pyrometallurgische Akkurecycling ist über Daten von GREET und EverBat abgebildet (Dai et al. 2019).

Umweltwirkungen der Fahrzeugherstellung und -entsorgung

Abbildung 4 zeigt den Einfluss unterschiedlicher Fahrzeugkomponenten auf die Treibhausgasemissionen eines heutigen Mittelklasse-Pkw. Die unterschiedlichen Antriebsarten führen selbst bei ansonsten ähnlich konfigurierten Mittelklasse-Pkw zu deutlichen Unterschieden in den Umweltwirkungen aus der Fahrzeugherstellung und Entsorgung, wobei insbesondere die Herstellung der Traktionsbatterie sowie die Batteriegröße (bzw. die Fahrzeugreichweite) einen Einfluss auf die Umweltwirkungen haben.

Abbildung 4: Treibhausgasemission der Pkw-Herstellung und Entsorgung 2020 im Detail



Alle Fahrzeuge haben einen relativ ähnlichen Fahrzeugrumpf, welcher bei den konventionellen Pkw deutlich die Treibhausgasemissionen dominiert. Der Tausch des verbrennungsmotorischen Antriebsstranges durch einen rein elektrischen Antriebsstrang ändert wenig an den Treibhausgasemissionen der Fahrzeugherstellung. Der batterieelektrische Mittelklasse-Pkw hat

jedoch deutlich höhere Emissionen gegenüber den konventionellen Fahrzeugen durch die zusätzlichen Treibhausgasemissionen aus der Batterieherstellung. Noch schlechter schneidet aktuell das Brennstoffzellen-Fahrzeug ab, da sowohl die Brennstoffzelle als auch der Typ IV karbonfaserverstärkte Wasserstofftank einen deutlichen Einfluss auf die Treibhausgasemissionen haben. Die Herstellung des Plug-in-Hybrides liegt zwischen den konventionellen Pkw und dem Elektro-Pkw, da dieser zwar einen deutlich kleineren Akku als ein reiner Elektro-Pkw hat (13,4 kWh anstelle von 55 kWh in 2020), aber sowohl den verbrennungsmotorischen als auch den elektrischen Antriebstrang benötigt. Die Fahrzeugentsorgung verursacht dabei nur 5 bis 8 % der Treibhausgasemissionen, welche in der Herstellungsphase anfallen.

Einen Gesamtüberblick der Treibhausgasemissionen aus Fahrzeugherstellung und -Entsorgung 2020 und 2030 zeigt Abbildung 5. Bis 2030 steigen die Treibhausgasemissionen des Benzin-Pkw und des Diesel-Pkw durch die Hybridisierung (bzw. durch den zusätzlichen elektrischen Antriebstrang sowie den kleinen Akku) geringfügig an. Technologische Weiterentwicklungen beim Brennstoffzellenfahrzeug (insbesondere Verbesserungen bei der Brennstoffzelle und eine geringere Platinbeladung) führen dagegen zu deutlich geringeren Treibhausgasemissionen aus der Fahrzeugherstellung 2030, welche allerdings immer noch deutlich über dem Niveau der konventionellen Fahrzeuge liegen.

Abbildung 5: Treibhausgasemission der Pkw-Herstellung und Entsorgung 2020 und 2030

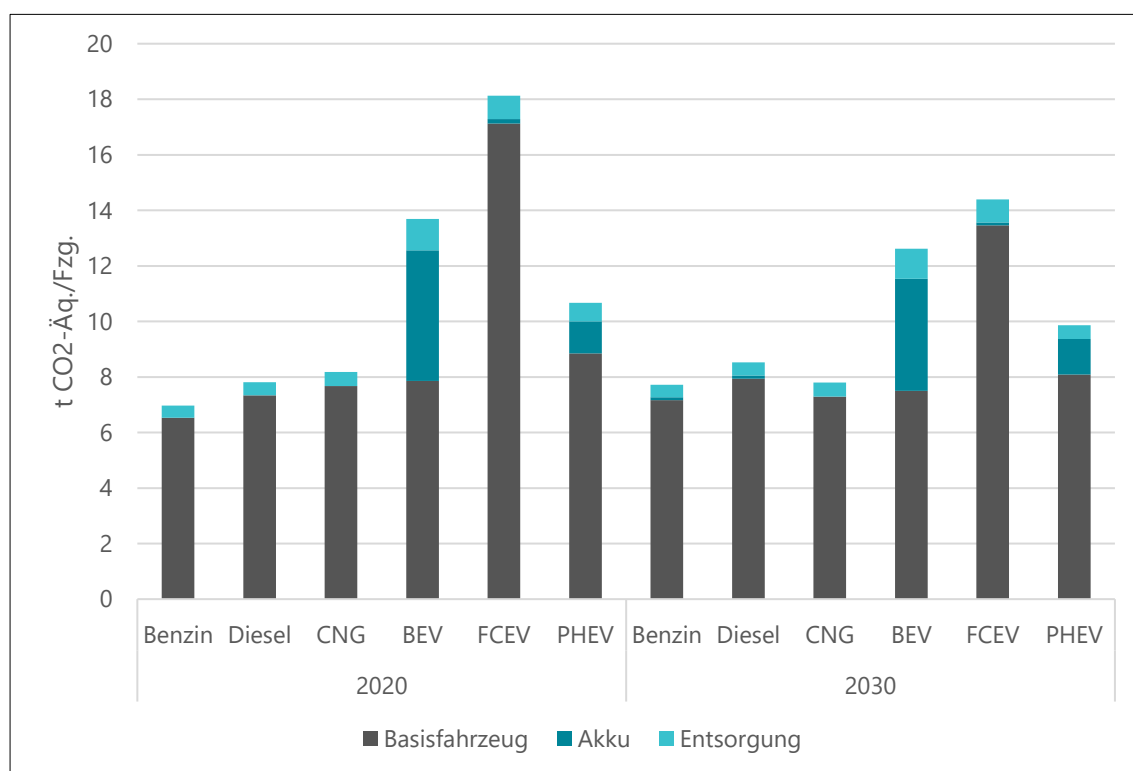
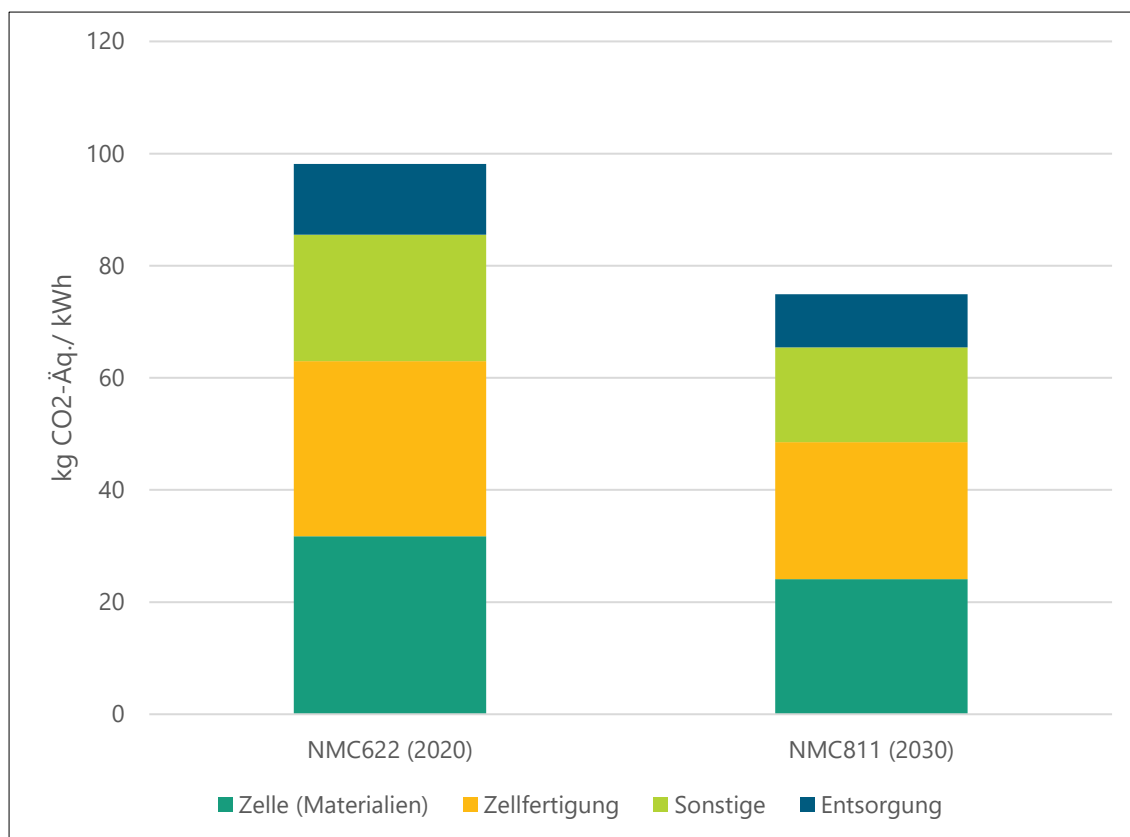


Abbildung 6: Treibhausgasemissionen der Fahrzeugbatterien 2020 (NMC622) und 2030 (NMC811) im Detail

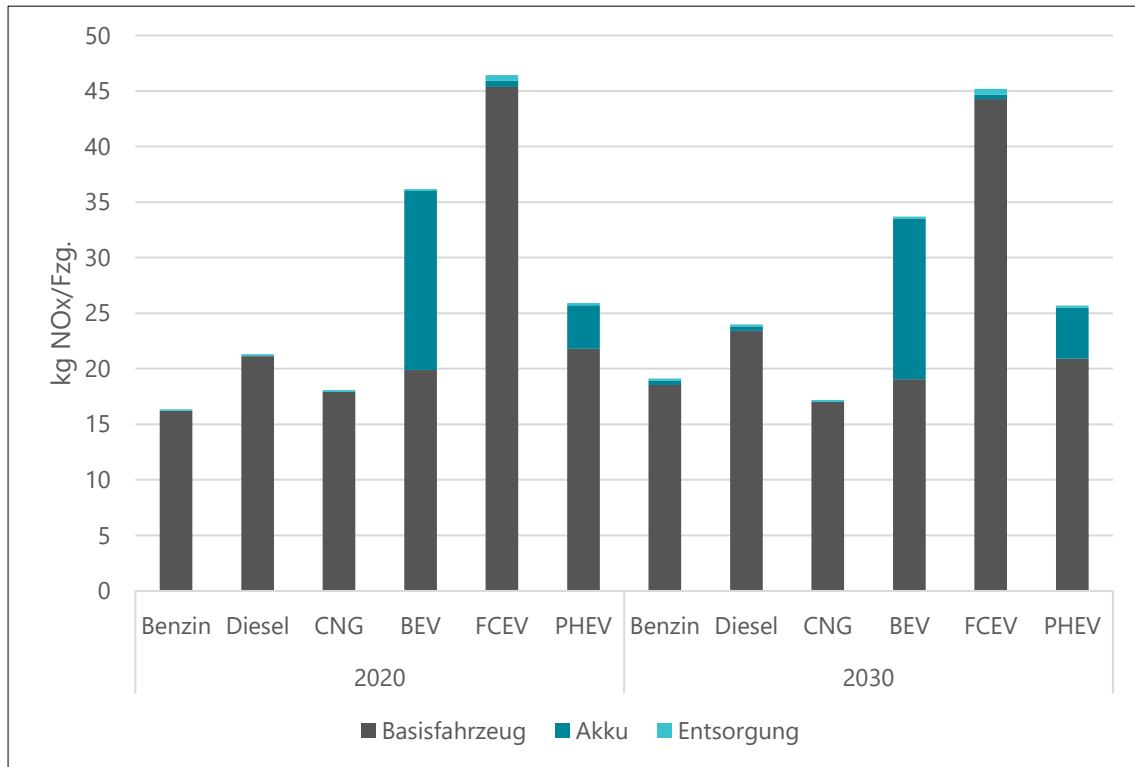
Auch bei den Traktionsbatterien gibt es deutliche Verbesserungen im Herstellungsprozess (siehe Abbildung 6). Hier sind sowohl die Zellmaterialien (allen voran die Aktivmaterialien) als auch die eigentliche Zellfertigung (bzw. der damit verbundene Energieaufwand) 2020 für zwei Drittel der Treibhausgasemissionen der Traktionsbatterie verantwortlich. Die weiteren Batteriekomponenten (Batteriemanagementsystem, Kühlung sowie Gehäuse) und die Entsorgung haben einen deutlich geringeren Einfluss. Verbesserungen bei der Traktionsbatterie werden bis 2030 jedoch durch eine Änderung der Zellchemie (von NMC622 2020 zu NMC811 in 2030) und der damit einhergehenden steigenden Energiedichte (150 Wh/kg in 2020 und 200 Wh/kg in 2030 auf Systemebene) erreicht. Zudem wird angenommen, dass die Zellfertigung in 2030 weniger Energie benötigt als heute und die Zellproduktion von Asien bzw. den USA nach Europa verlagert wird, was ebenfalls zur Treibhausgasreduktion beiträgt. Insgesamt kompensiert jedoch die angenommene Steigerung der Fahrzeugreichweite bei batterieelektrischen Pkw (und dem damit verbundenen Anwachsen der Batteriegröße von 55 kWh auf 69 kWh) die Verbesserungen bei der Batterieherstellung nahezu (siehe Abbildung 5).

Luftschadstoffemissionen der Fahrzeugherstellung und -entsorgung

Neben den Treibhausgasemissionen wurden auch die Stickoxidemissionen (NO_x) sowie die Feinstaubemissionen (PM10) ausgewertet.

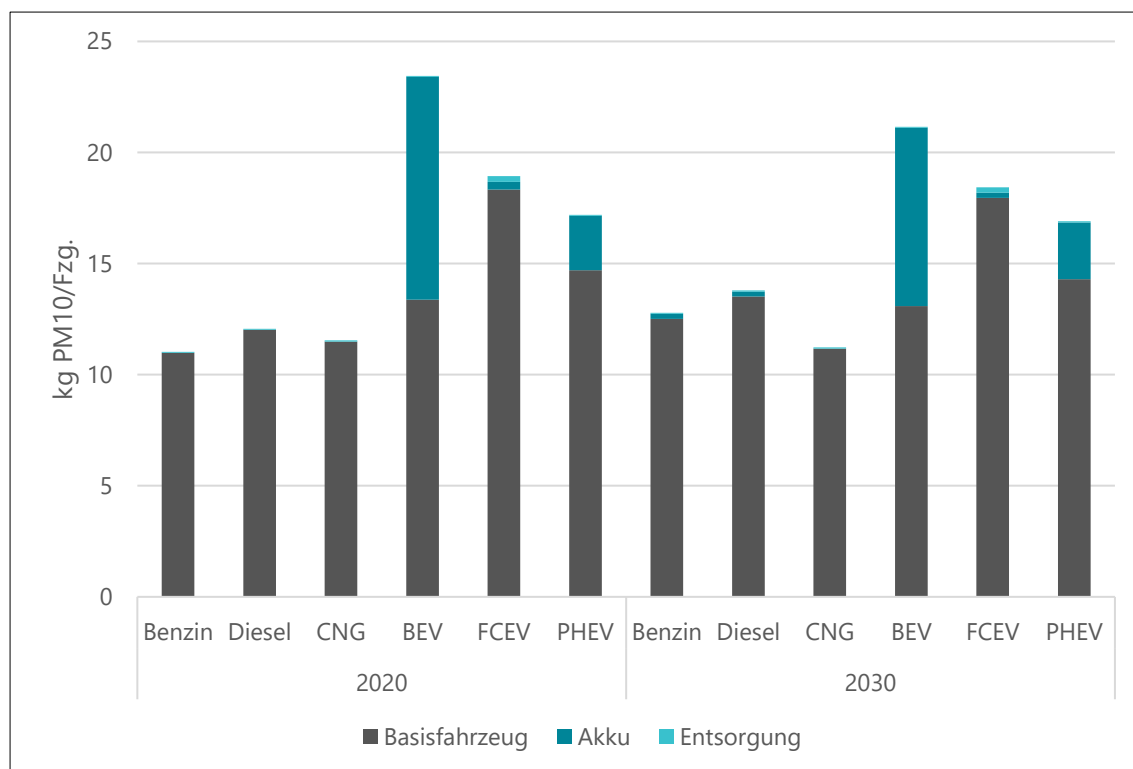
Bei den in Abbildung 7 gezeigten Stickoxidemissionen aus der Pkw-Herstellung und Entsorgung zeigt sich ein sehr ähnliches Bild wie bei den Treibhausgasen. Auch hier hat der Brennstoffzellen-Pkw die höchsten Emissionen, gefolgt vom Elektro-Pkw, während die konventionellen Fahrzeuge besser abschneiden.

Abbildung 7: Stickoxidemissionen der Pkw-Herstellung und Entsorgung 2020 und 2030



Dies liegt, wie bei den Treibhausgasemissionen, an den zusätzlichen Lasten für die Herstellung von Brennstoffzelle und Traktionsbatterie.

Bei den Feinstaubemissionen zeigt sich ebenfalls der Trend (Abbildung 8), dass alternative Antriebe in der Herstellung tendenziell zu höheren Lasten führen als die konventionellen. Beim Feinstaub ist jedoch der Einfluss der Batterie größer, sodass hier das Elektrofahrzeug höhere Feinstaubemissionen als das Brennstoffzellenfahrzeug verursacht.

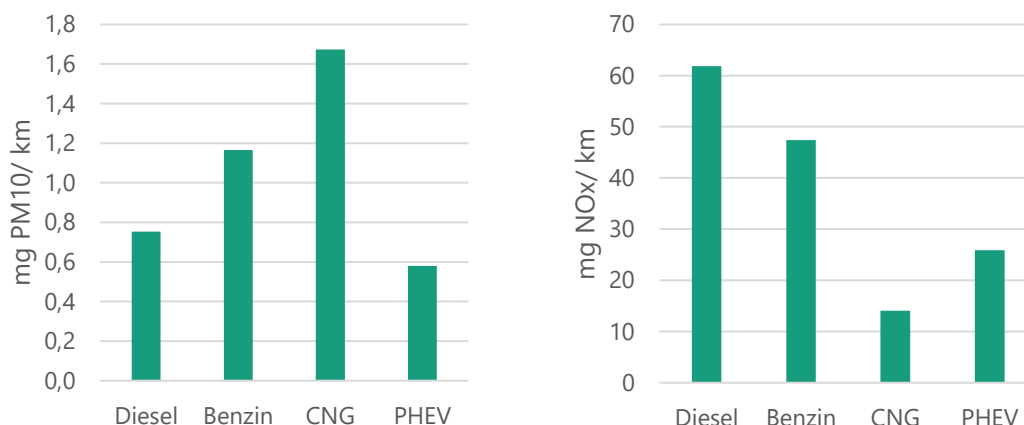
Abbildung 8: Feinstaubemissionen (PM10) der Pkw-Herstellung und Entsorgung 2020 und 2030

Eine reine Ausweisung der Schadstoffemissionen reicht jedoch oftmals nicht aus, um die Schädlichkeit dieser zu bewerten. So haben vor Ort anfallende bodennahe direkte Auspuffemissionen (z. B. in dicht besiedelten Gebieten) eine andere Schädlichkeit als die Emissionen aus den Vorketten (z. B. Feinstaubemissionen aus Fabrikschornsteinen).

3.5 Emissionen aus der Wartung sowie direkte Auspuffemissionen

Während der Elektro-Pkw und der Brennstoffzellen-Pkw keine Auspuffemissionen aufweisen, müssen für die verbrennungsmotorischen Antriebskonzepte die Schadstoffemissionen der Nutzung (Feinstaub sowie Stickoxide) ebenfalls bilanziert werden. Dabei geht diese Studie davon aus, dass alle neuzugelassenen Pkw die aktuelle Abgasnorm Euro 6d erfüllen. Speziell bei den Stickoxidemissionen haben sich große Unterschiede zwischen den vorhergehenden Stufen, Euro 6a-c, und der neuen Euro 6d-Norm gezeigt, da hier auch im Realbetrieb bestimmte Emissionsgrenzen nicht überschritten werden dürfen.

Daten für die Schadstoffemissionen aus dem Pkw-Betrieb werden aus dem Transport Emissions Modell (TREMOS; ifeu 2020) des ifeu entnommen und basieren auf dem Handbuch für Emissionsfaktoren (Notter et al. 2019).

Abbildung 9: PM10- und NOx-Auspuffemissionen von Euro 6d Pkw nach TREMOD 6.16

Nicht untersucht werden in dieser Studie die Feinstaubemissionen aus Abrieb und Aufwirbelung.

Aufwendungen für die Pkw-Wartung werden auf Basis der ecoinvent-Daten bilanziert, diese sind jedoch gegenüber den sonstigen Emissionen aus der Pkw-Herstellung und dem Pkw-Betrieb von geringerer Bedeutung und werden daher hier nicht gesondert dargestellt.

3.6 Vergleich der Treibhausgasemissionen

In Abbildung 10 sind die kumulierten THG-Emissionen über die gesamte Lebensdauer (15 Jahre bzw. 187.500 km) für einen Kompaktklasse-Pkw in Deutschland, der im Jahre 2020 angeschafft wurde, aufgeführt. Hier zeigt sich, dass die Nutzungsphase die Treibhausgasbilanz deutlich dominiert, so lange nicht ausschließlich erneuerbarer Strom bei den alternativen Kraftstoffen und Antriebssystemen zum Einsatz kommt.

Grundsätzlich weist der Elektro-Pkw im Antriebsvergleich auch bei Nutzung des heutigen Strommixes mit Abstand die geringsten Treibhausgasemissionen auf. Gegenüber dem Benzin-Pkw halbieren sich die Treibhausgasemissionen nahezu. Aufgrund der durch die Konversionsverluste bedingten hohen Lasten der Wasserstoffherstellung bei Verwendung des Strommixes und den hohen Aufwendungen für den Brennstoffzellen-Pkw hat dieser aktuell noch keine Vorteile bei den Treibhausgasemissionen. Erdgas-Pkw sowie Plug-in-Hybrid-Pkw schneiden besser ab als reine Benzin-Pkw, aber liegen deutlich über dem reinen batterieelektrischen Pkw.

Bei den konventionellen Fahrzeugen dominiert aktuell die Nutzung der fossilen Kraftstoffe die Treibhausgasemissionen. Auch bei heutigen Plug-in-Hybrid-Pkw sowie Brennstoffzellen-Pkw dominieren die Energieträger bzw. deren Bereitstellung. Der batterieelektrische Pkw hingegen zeigt bereits heute bei einer Nutzung des (im Laufe des Pkw-Lebens immer stärker dekarbonisierten) Strommixes, dass in Zukunft der Pkw-Herstellung eine sehr wichtige Rolle zukommt.

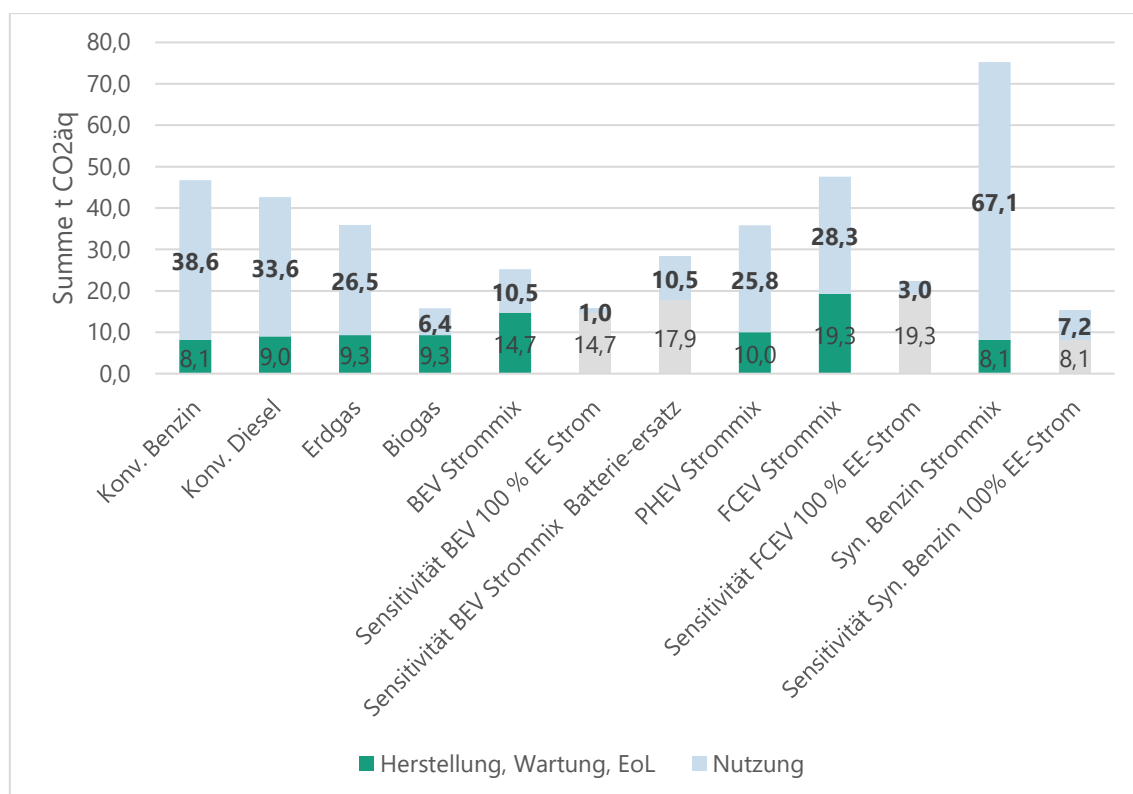
Abbildung 10: THG-Emissionen für einen in 2020 angeschafften Kompaktklasse-Pkw

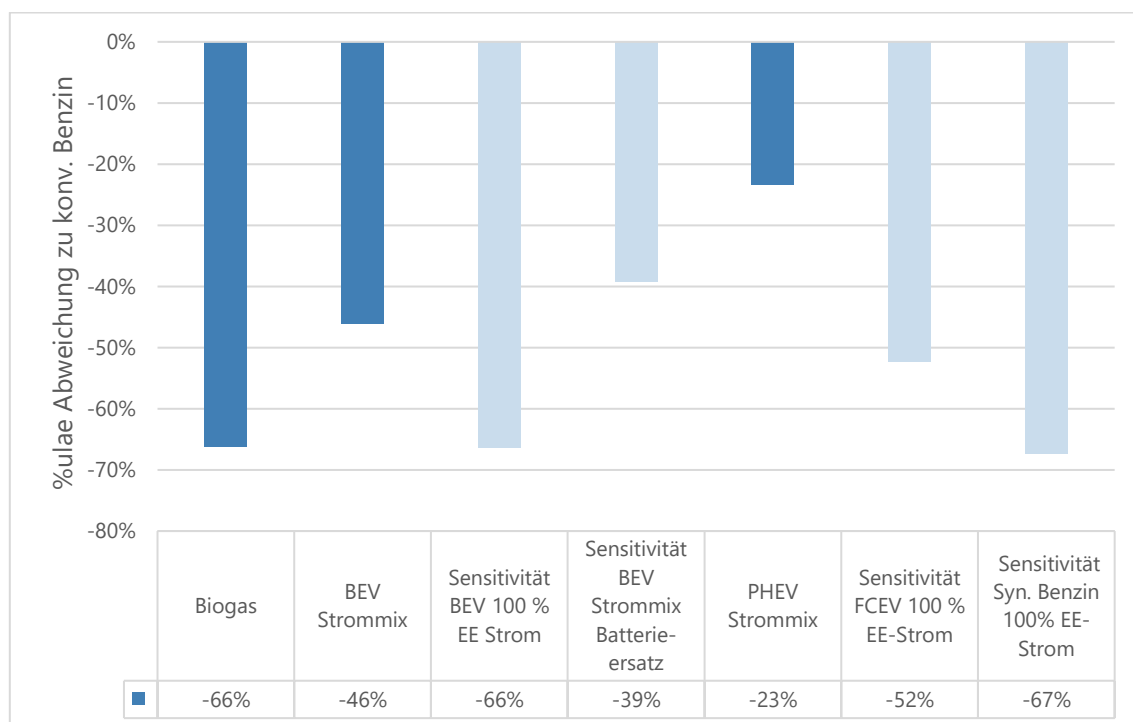
Abbildung 10 zeigt auch ausgewählte Sensitivitäten für die Treibhausgasemissionen eines 2020 angeschafften Kompaktklasse-Pkw. Zu sehen ist, dass der Einsatz erneuerbarer Energien (reiner erneuerbarer Strom sowie Biogas) zu sehr deutlichen Treibhausgasemissionsminderungen führt.

Speziell ein mit 100 % Biogas betriebenes Fahrzeug hat sehr hohe Einsparungen gegenüber den konventionellen Fahrzeugen (siehe auch Abbildung 11). Ebenfalls erhöht sich die Minderung der THG-Emissionen beim BEV deutlich, wenn 100 % erneuerbarer Strom eingesetzt wird. In der Praxis ist dies derzeit jedoch nur schwer zu realisieren, da für Erdgas kein getrenntes Verteilungssystem für Biogas existiert und beim erneuerbaren Strom die Zusätzlichkeit der Erneuerbaren-Erzeugung im nationalen Rahmen kaum sichergestellt werden kann (siehe die ausführliche Diskussion hierzu in Kapitel 3.2). Weiterhin sind hier sehr unterschiedliche Verfügbarkeiten zu berücksichtigen. So ist nachhaltige Biomasse nur sehr begrenzt verfügbar und kann damit nur einen kleinen Teil der Pkw-Flotte defossilisieren.

Muss die Batterie des Elektro-Pkw einmal ausgetauscht werden, verringert sich der THG-Vorteil eines BEV. Das BEV hat aber trotzdem auch bei der Nutzung des Strommixes noch fast 40 % geringere Treibhausgasemissionen als der Benzin-Pkw heute. Für den FCEV-Pkw ergibt sich nur bei der Verwendung von erneuerbarem Strom zur H₂-Produktion eine deutliche THG-Minderung. Bei Zugrundelegung des Strommix bei der Berechnung der Emissionen für synthetische Kraftstoffe liegen die THG-Emissionen signifikant über denen der konventionellen Pkw. Dies liegt an den hohen Wirkungsgradverlusten der gesamten Umwandlungskette. Wie bei den FCEV kommt nur die Stromerzeugung aus Erneuerbaren-Anlagen zu einer positiven Emissionsbilanz, auch hier gibt es jedoch zahlreiche Herausforderungen, dies nachhaltig sicherzustellen.

Unterstellt man eine höhere Lebenslaufleistung bei den Fahrzeugen, dann profitieren die BEV und die FCEV davon, da sie auf den km-bezogen während der Nutzung niedrigere THG-Emissionen ausweisen im Vergleich zu einem Benzin- oder Diesel und der höhere THG-Rucksack in der Herstellung dann weniger ins Gewicht fällt. Bei einer niedrigeren Lebenslaufleistung kehrt sich der Effekt herum.

Abbildung 11: Abweichung der THG-Emissionen gegenüber einem konventionellen Benzin- für ein in 2020 angeschaffter Kompakt-Pkw



In 2030 ist aufgrund der deutlichen Treibhausgasreduzierungen in der Strombereitstellung bei fast allen betrachteten Alternativen die Herstellungsphase bedeutsamer als die Nutzungsphase (siehe Abbildung 12). Alle Alternativen weisen unter den getroffenen Annahmen, u. a. der fortschreitenden Dekarbonisierung des Stromsystems, eine deutliche Minderung der THG-Emissionen auf (siehe auch Abbildung 13).

Die Betrachtung der Treibhausgasemissionen für einen 2030 angeschafften Pkw zeigt, dass sich bei den konventionellen Pkw mit fossilen Kraftstoffen gegenüber 2020 nur geringe Veränderungen zeigen. Der Verbrauch des Pkw sinkt durch die Hybridisierung, allerdings steigen auch die Herstellungsemissionen dadurch leicht an. Beim batterieelektrischen Pkw sowie dem Brennstoffzellen-Pkw hingegen sinken die Treibhausgasemissionen gegenüber 2020 deutlich. Obwohl die Pkw-Herstellung (insbesondere batterieelektrische sowie Brennstoffzellen-Fahrzeuge) sich deutlich verbessert, liegen die Herstellungsaufwendungen weiterhin über denen der konventionellen Fahrzeuge. Deutliche Verbesserungen beim Strommix durch die fortschreitende Dekarbonisierung führen allerdings zu starken Treibhausgasreduzierungen und lassen den Treibhausgasvorteil des BEV auf fast 60 % gegenüber dem Benzin-Pkw ansteigen. Auch der FCEV-Pkw mit Strommix sowie der Benzin-Pkw mit synthetischem Kraftstoff aus dem Strommix werden nun konkurrenzfähig, liegen aber deutlich oberhalb des BEV.

Wird hingegen rein erneuerbarer Strom verwendet, liegen der Benzin-Pkw mit synthetischem Benzin aus 100 % EE-Strom und der batterieelektrische Pkw mit reinem EE-Strom etwas gleich auf. Die notwendigen Erneuerbaren-Erzeugungskapazitäten unterscheiden sich jedoch deutlich: So wird für den Pkw mit synthetischem Benzin etwa die fünf bis sechsfache Menge an erneuerbarem Strom benötigt, was einen entsprechend stärkeren Ausbau der Erneuerbaren-Erzeugungskapazitäten (sprich Windkraftanlagen oder PV-Module) notwendig macht.

Generell sieht man bei allen Fahrzeugen, dass die Herstellung einen immer größeren Anteil an den THG-Emissionen ausmacht.

Abbildung 12: THG-Emissionen für einen in 2030 angeschafften Kompaktklasse-Pkw

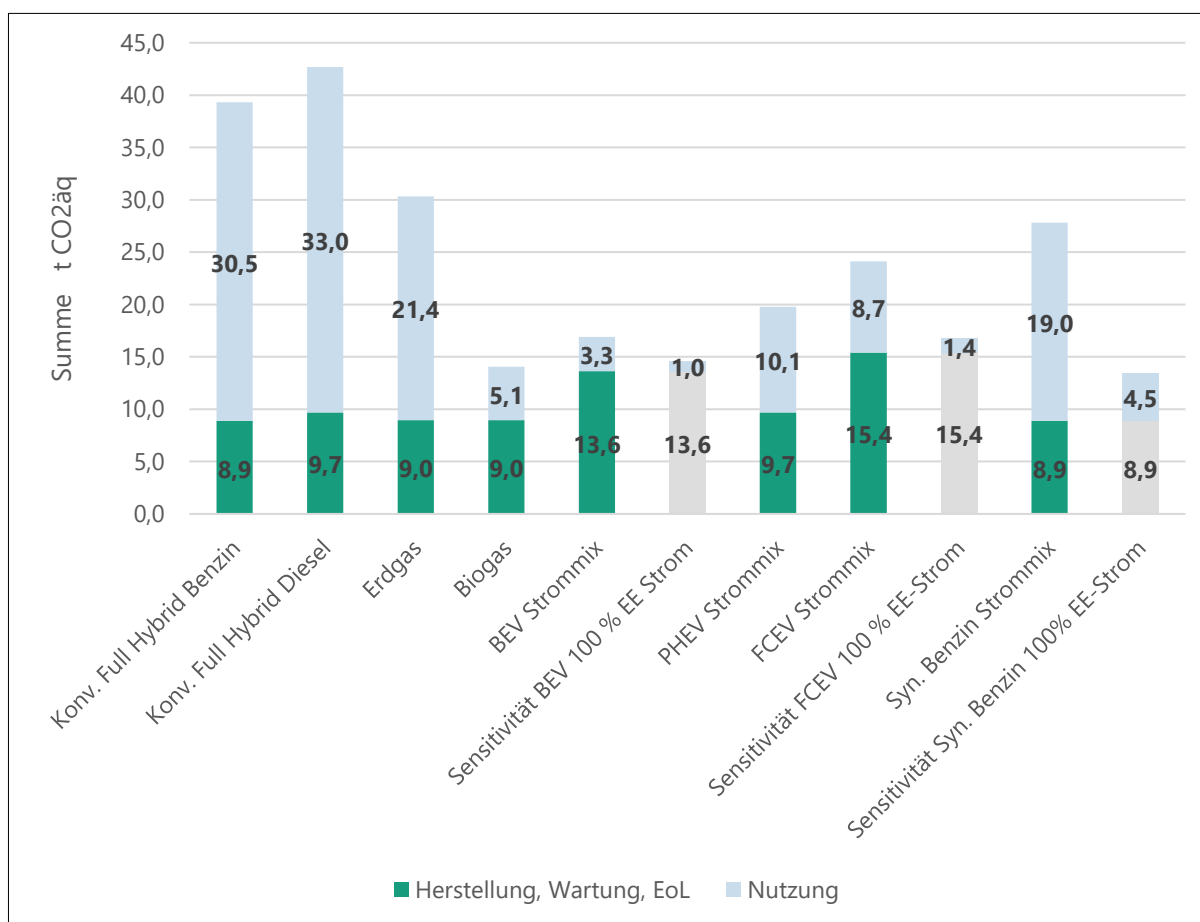
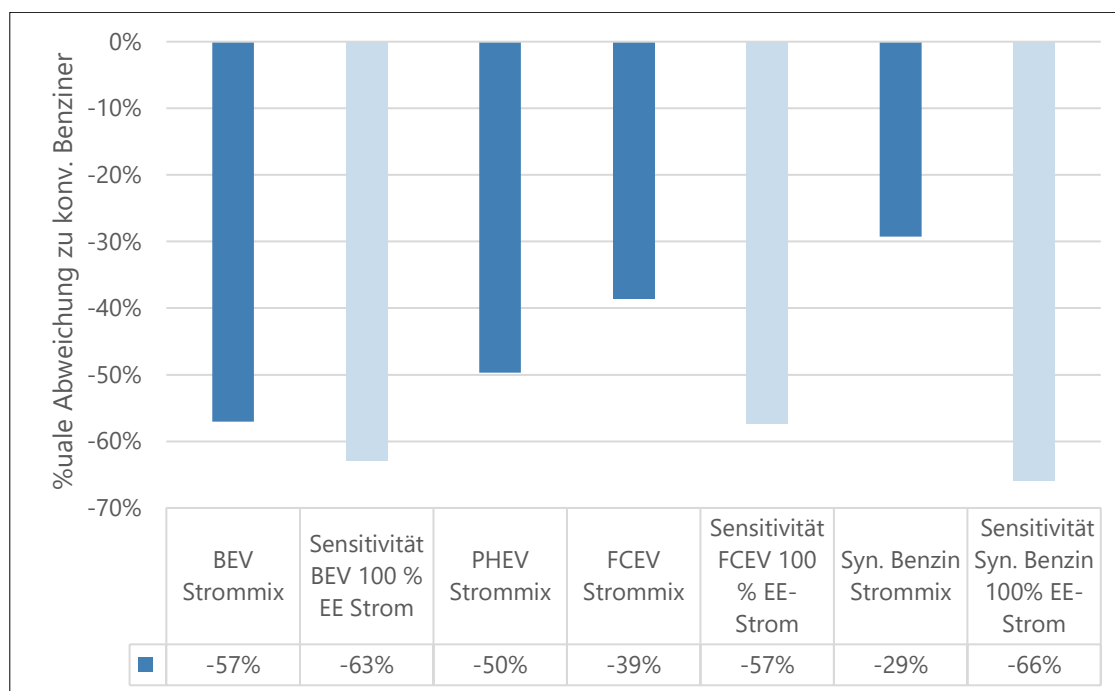


Abbildung 13: Abweichung der THG-Emissionen gegenüber einem konventionellen Benzin-Kompaktklasse-Pkw für einen in 2030 angeschafften Pkw

3.7 Vergleich der Stickoxid- und Feinstaubemissionen

In der Vergangenheit waren die Schadstoffemissionen von konventionellen Pkw stark durch die direkten Auspuffemissionen bestimmt.

Im Zuge der stetigen Verschärfungen der Abgasgrenzwerte von Pkw, die nun auch im Realbetrieb einzuhalten sind, haben jedoch in letzter Zeit die Auspuffemissionen in der Gesamtbeurteilung der Prozesskette deutlich an Bedeutung verloren, sodass nun die Bereitstellung der Energieträger sowie die Fahrzeugherstellung selbst in den Vordergrund rückt und die Emissionsbilanz über den Lebensweg dominieren (siehe Abbildung 14). Dennoch sind insbesondere die lokalen Belastungen der Luftqualität in dicht besiedelten städtischen Gebieten weiterhin ein Anreiz, Pkw ohne direkte Emissionen (also Elektro-Pkw) einzusetzen.

Die Betrachtung der Schadstoffemissionen über den gesamten Lebensweg hingegen zeigt jedoch eine deutliche Dominanz der Energiebereitstellung sowie der Pkw-Herstellung. Die geringsten NO_x-Emissionen aus der gesamten Prozesskette haben daher die konventionellen Pkw. Die NO_x-Emissionen der BEV liegen leicht oberhalb, und der FCEV schneidet deutlich schlechter ab. Dies liegt unter anderem an den höheren Herstellungsemissionen der Pkw mit alternativen Antrieben, getrieben auch durch die Emissionen der Batterie bzw. der Brennstoffzelle. Ebenfalls einen relevanten Einfluss auf die gesamten Stickoxidemissionen hat die Stromerzeugung. Hier spielt neben den direkten Kraftwerksemissionen auch die Errichtung der Erzeugungsanlagen eine Rolle. Am schlechtesten schneiden daher Benzin-Pkw ab, welche mit synthetischem Kraftstoff aus dem Strommix betrieben werden, da hier für die Kraftstoffherstellung große Mengen an Strom benötigt werden.

Abbildung 15 zeigt die Stickoxidemissionen für einen 2030 angeschafften Kompaktklasse-Pkw. Auch hier haben die Pkw mit alternativen Antrieben höhere Stickoxidemissionen als die konventionellen Pkw mit Benzin oder Erdgas betreiben, obwohl sich sowohl die Pkw-Herstellung

als auch die Strombereitstellung gegenüber heute deutlich verbessert. Ein BEV liegt nur noch leicht oberhalb einem Benzin- oder einem Erdgasfahrzeug und schneidet gegenüber einem Diesel etwas besser ab.

Die Gesamtbilanz über die Fahrzeuglebensdauer für die PM₁₀-Emissionen zeigen die Abbildung 16 und Abbildung 17. Hier zeigen sich die gleichen Trends, da die konventionellen Fahrzeuge in der Menge nur noch wenig Partikel ausstoßen.

Bei den PM₁₀-Emissionen dominiert entsprechend deutlich die Pkw-Herstellung, hier insbesondere die Stahlherstellung und einige für die Batterie benötigte Metalle, sowie die Strombereitstellung die Bilanz. Damit schneiden BEV und FCEV schlechter ab als die konventionellen Fahrzeuge. Insbesondere fällt hier die Batterieherstellung ins Gewicht. Synthetische Kraftstoffe zeigen auch bei den PM₁₀-Emissionen die höchsten Werte aufgrund der Emissionen im Kraftwerkspark.

Im Gegensatz zu den Stickoxidemissionen verändern sich die PM₁₀-Emissionen des Strommixes unter den getroffenen Annahmen im Laufe der Zeit kaum. Emissionssenkungen sind also für 2030 nur durch Verbesserungen bei der Pkw-Herstellung und bei den Batterien zu erwarten, führen jedoch nicht zu einer Trendumkehr.

Abbildung 14: NO_x-Emissionen für einen in 2020 angeschafften Kompaktklasse-Pkw

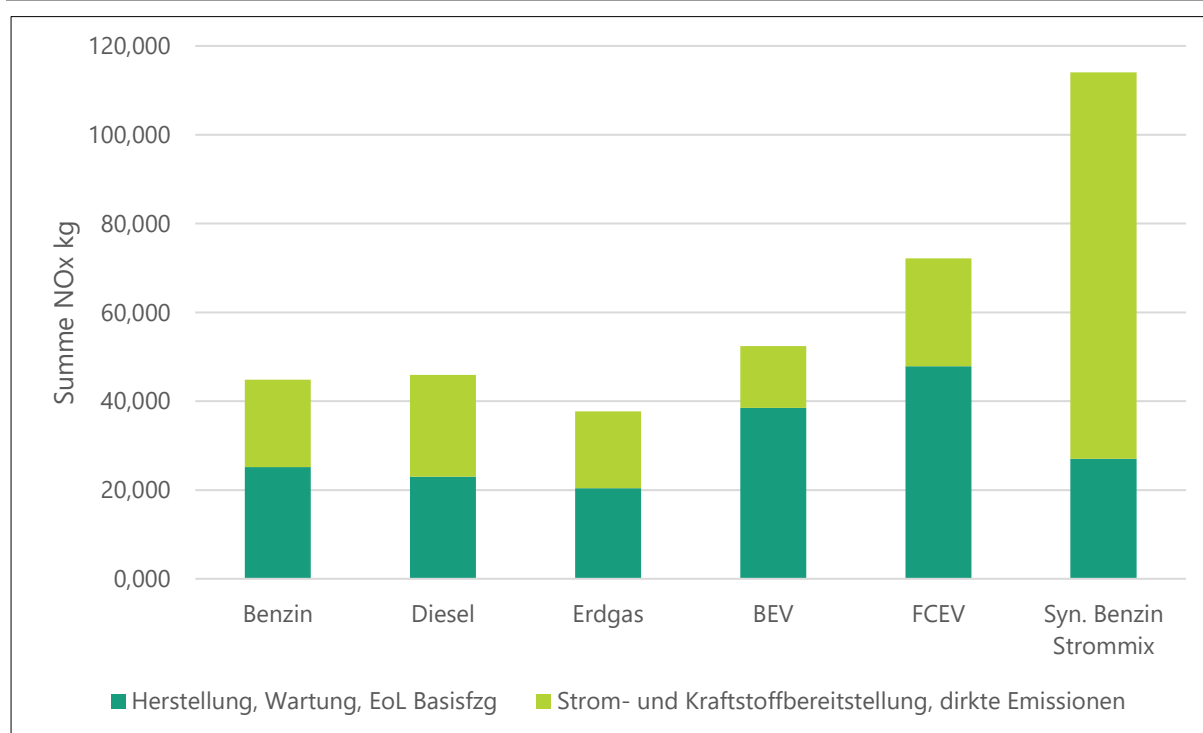


Abbildung 15: NOx-Emissionen für einen in 2030 angeschafften Kompaktklasse-Pkw

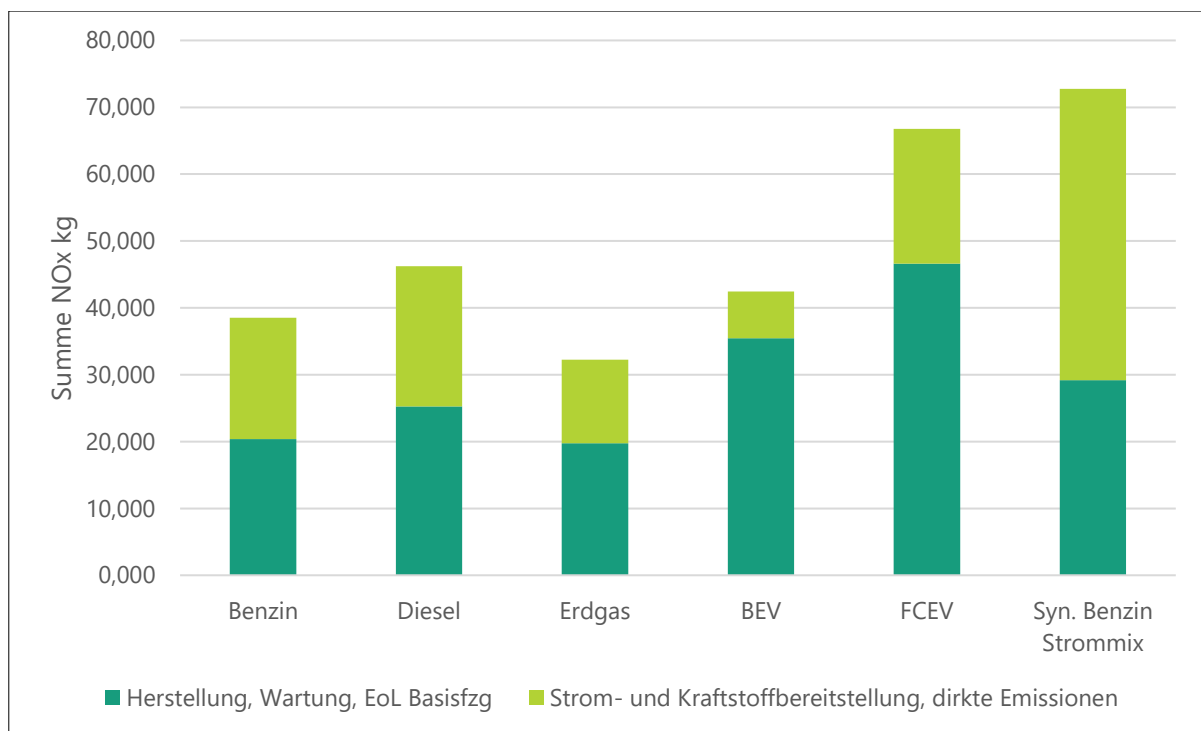


Abbildung 16: PM10-Emissionen für einen in 2020 angeschafften Kompaktklasse-Pkw

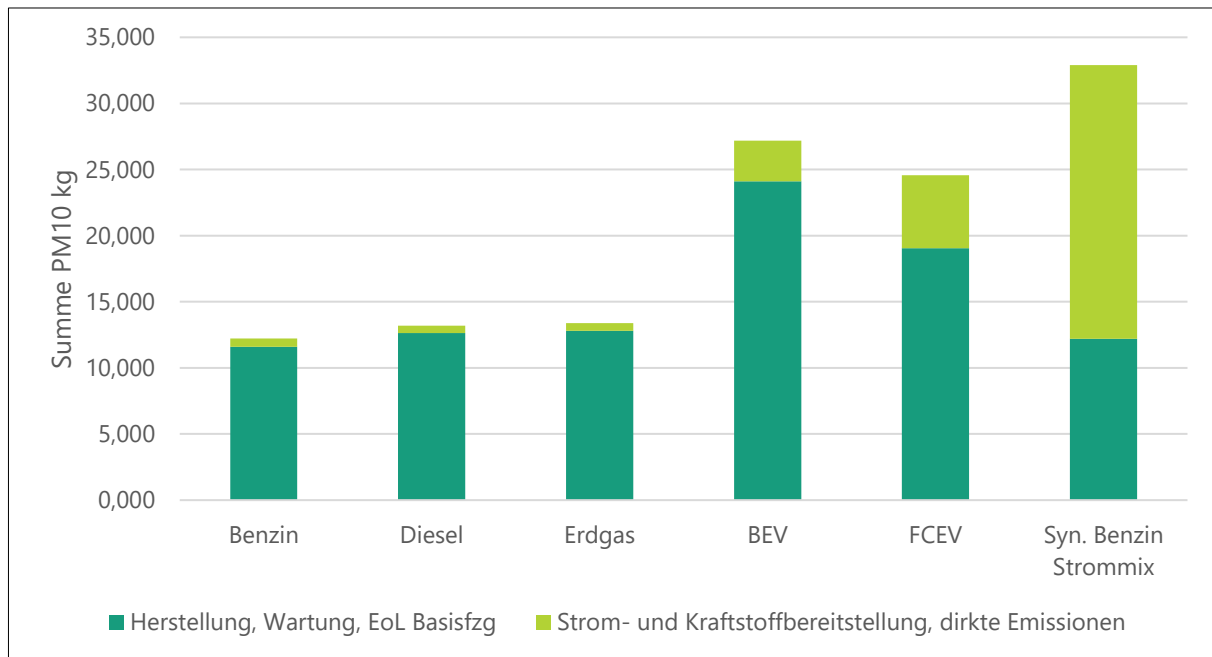
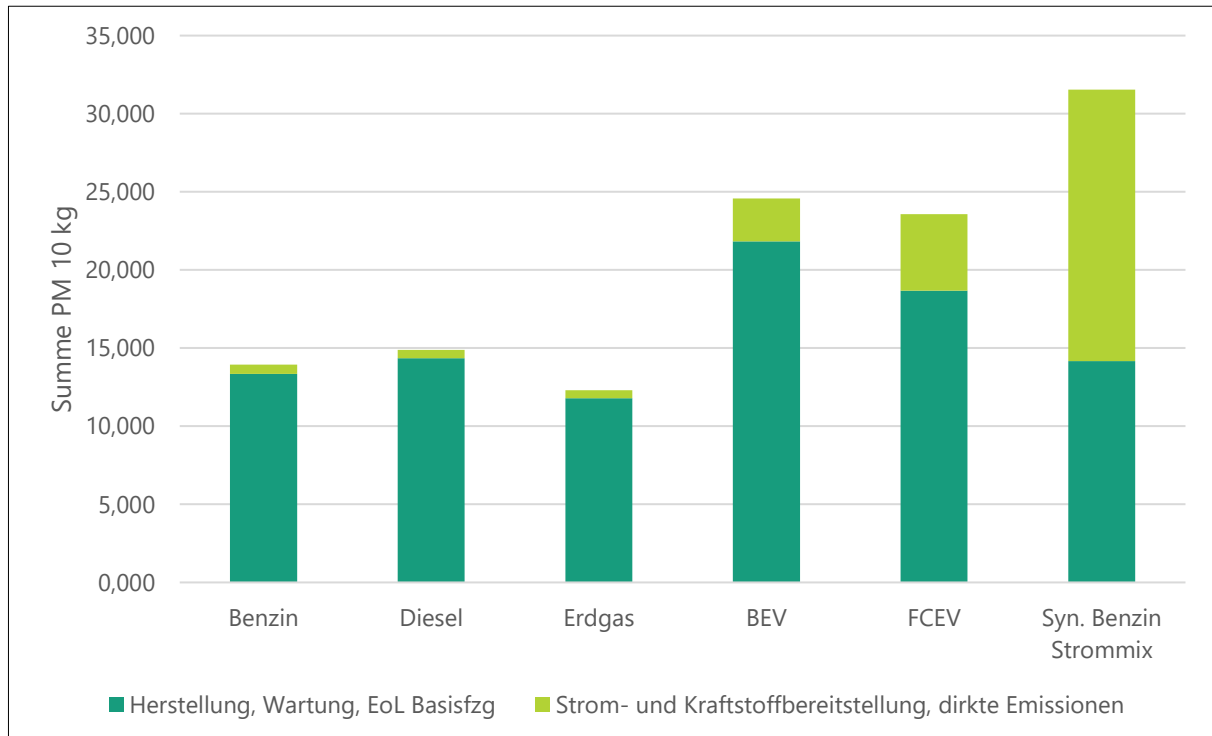


Abbildung 17: PM10-Emissionen für einen in 2030 angeschafftes Kompaktklasse-Pkw



3.8 Vergleich der kritischen Rohstoffe

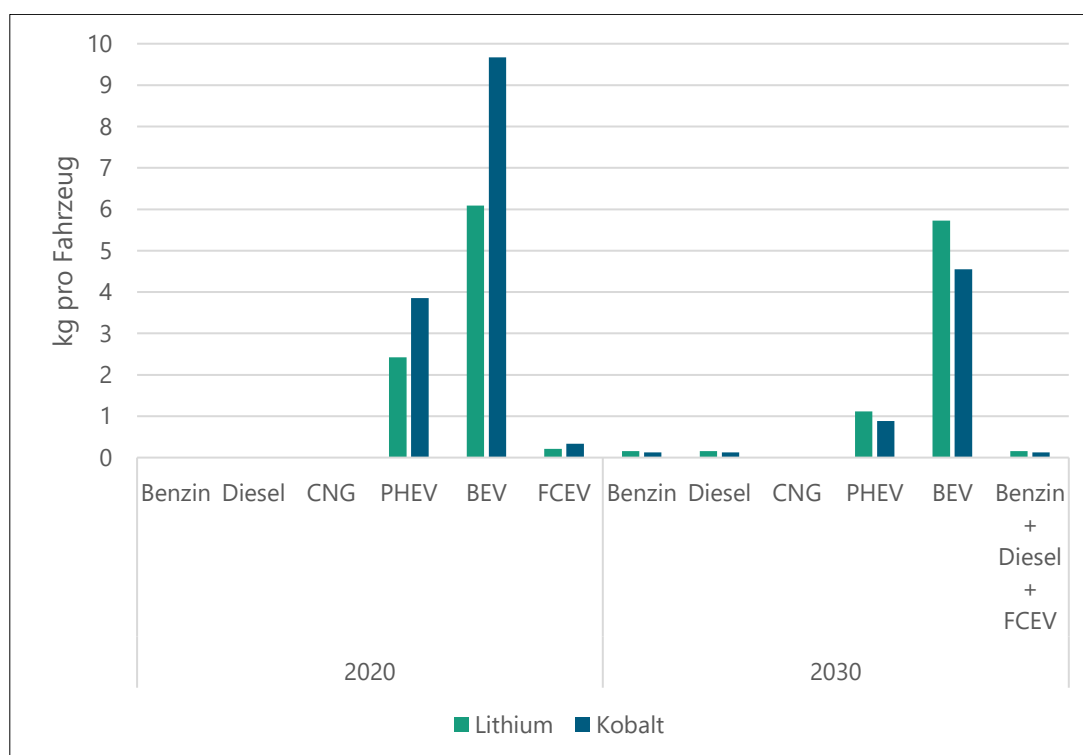
Durch den Einsatz von Elektro-Pkw (oder den Umstieg auf erneuerbare Kraftstoffe) werden fossile Ressourcen (Erdöl und Erdgas) geschont und Umweltwirkungen verringert. Dennoch stehen gerade Elektro-Pkw immer wieder in der Kritik, weil für ihre Herstellung eine Reihe von seltenen und potenziell kritischen Rohstoffen gebraucht werden.

Die im Folgenden untersuchten kritischen Rohstoffe wurden anhand ihrer Wichtigkeit für die betrachteten Antriebskonzepte, ihres (geopolitischen) Versorgungsrisikos sowie möglicher negativer sozialer und ökologischer Wirkungen betrachtet. Die Diskussion erfolgt entsprechend am Beispiel der Zellmaterialien Lithium und Kobalt, der für die Abgasnachbehandlung und Brennstoffzellen benötigten Platingruppenmetalle (PGM) und von Kupfer, das in allen elektrischen Bauteilen Verwendung findet.

Heutige Lithium-Ionen-Batterien benötigen relevante Mengen an Kobalt, welches nur in wenigen Ländern und oft unter problematischen Bedingungen abgebaut wird. Menschenrechtsverletzungen aber auch hohe Umweltlasten können eine Folge des Kobaltabbaus sein. Auch Lithium wird für die Batterieherstellung benötigt, wobei eine Ausweitung der Lithiumförderung zwar möglich ist, aber ebenfalls ökologische Risiken aufgrund des hohen Frischwasserverbrauchs sowie des Eingriffs in sensible Ökosysteme (z. B. Salzseen) hat.

Abbildung 18 zeigt die in den Pkw verbauten Mengen an Lithium und Kobalt. Da beide Materialien ausschließlich in der Traktionsbatterie eingesetzt werden, haben die konventionellen Pkw ohne Hybridisierung keinen Lithium- bzw. Kobaltbedarf.

Abbildung 18: Lithium und Kobalt im Pkw (2020 und 2030)



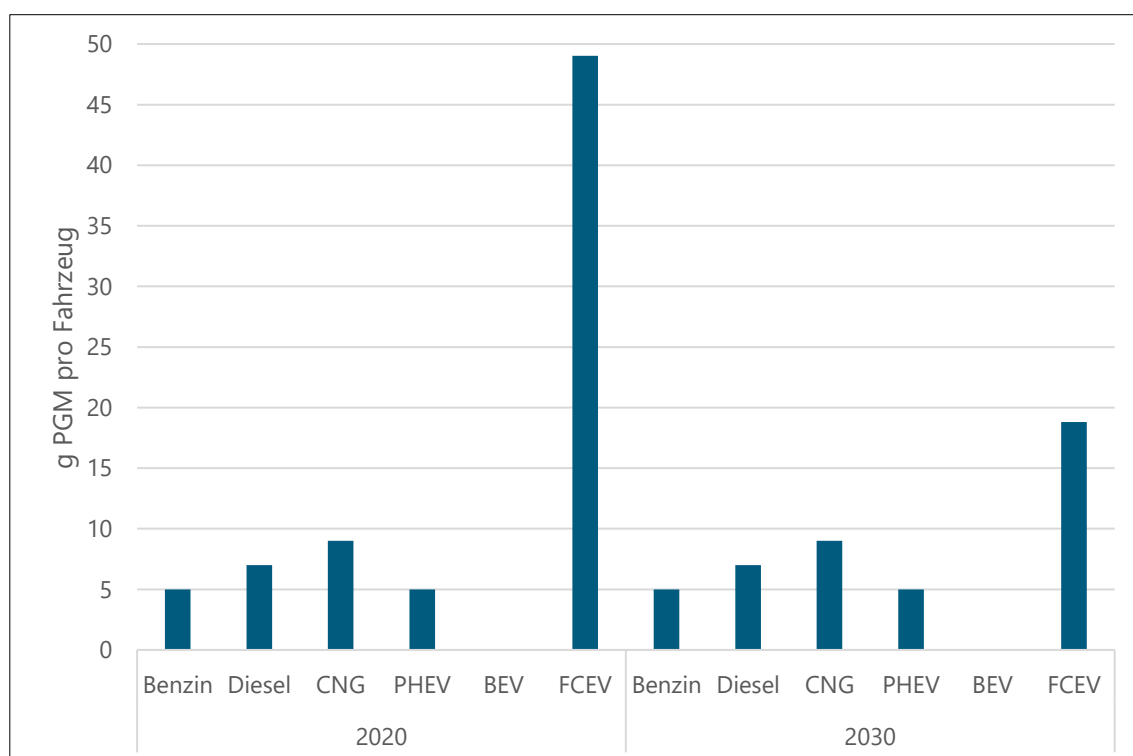
Je größer die Batterie ist, desto höher ist dementsprechend auch der Rohstoffbedarf. Daher haben die Elektro-Pkw einen höheren Rohstoffbedarf gegenüber den Plug-in-Hybriden und

Hybriden. Steigende Energiedichten bei den Batterien führen 2030 zu einem geringeren Materialbedarf pro kWh gegenüber 2020, sodass trotz steigender Akkukapazität der Lithiumbedarf leicht sinkt. Durch den Wechsel der Zellchemie von NMC622 zu NMC811 geht der Kobaltbedarf besonders deutlich zurück. Neben Nickel-Mangan-Kobalt (NMC)-Batterien könnten auch Batterien aus Lithium-Eisen-Phosphat (LFP) oder Lithium-Nickel-Mangan-Oxid (LNMO) eingesetzt werden, diese benötigen kein Kobalt. Weiterentwicklungen bei den Batterietechnologien ermöglichen in Zukunft den Einsatz von Post-Lithium-Batterien, eine vielversprechende Technologie können Natrium-Ionen-Batterien sein, welche kein Lithium mehr einsetzen.

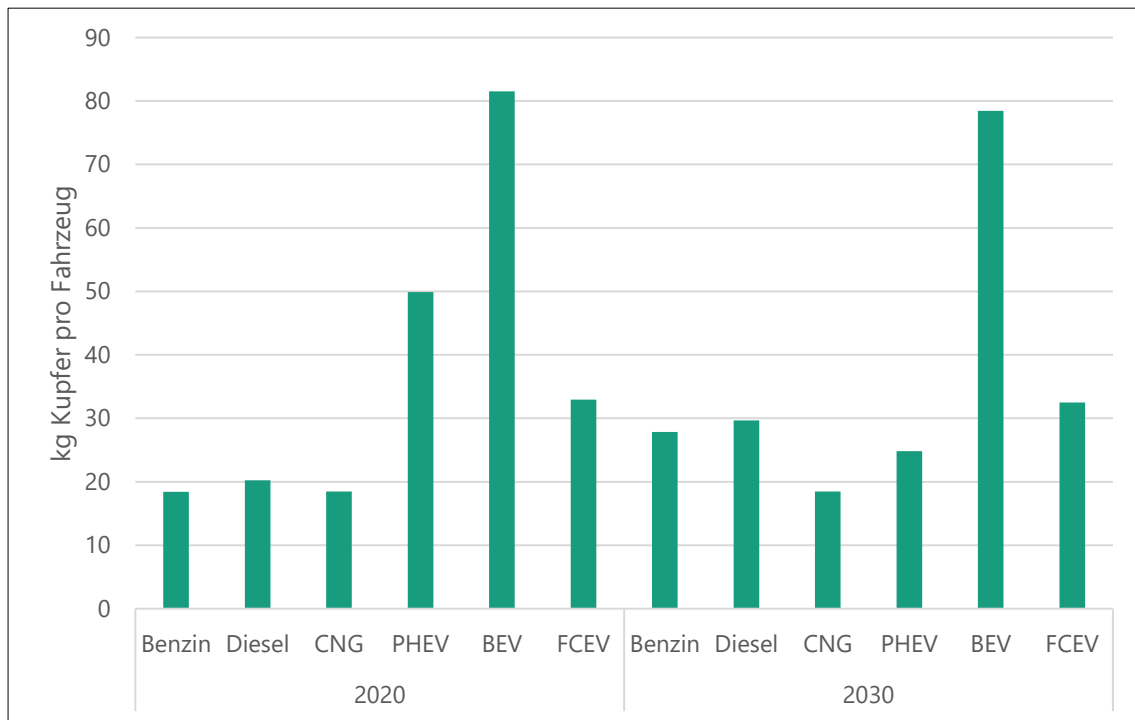
Die Platingruppenmetalle (Platin, Palladium, Rhodium) werden prinzipiell bei allen konventionellen Fahrzeugen für die Abgasreinigung gebraucht (siehe Abbildung 19). Für die Abgasreinigung des Diesel-Pkw werden hier größere Mengen an Platingruppenmetallen gebraucht als beim Benzin-Pkw, noch höhere PGM-Gehalte werden beim CNG-Pkw eingesetzt, um bei höheren Abgastemperaturen arbeiten zu können. Für die Abgasreinigung können neben Platin auch Palladium und Rhodium eingesetzt werden, alle drei Metalle sind jedoch aktuell ähnlich kritisch zu bewerten und wurden daher hier zusammengefasst betrachtet.

Die Brennstoffzelle benötigt jedoch gegenüber konventionellen Pkw deutlich größere Mengen des seltenen und mit hohen Umweltlasten im Abbau verbundenen Platin. Dies liegt an der aktuell noch sehr hohen Platinbeladung der Brennstoffzelle, welche jedoch 2030 deutlich absinkt. Im Elektro-Pkw werden dagegen keine PGM benötigt.

Abbildung 19: Platingruppenmetalle im Pkw (2020 und 2030)



Kupfer wird in vielen Sektoren gebraucht und findet auch Einsatz im Automobilbau (z. B. in den Elektromotoren oder den Kabeln) sowie in der Batterieherstellung. Auch die Kupferherstellung ist mit hohen Umweltlasten verbunden, zudem kann ein steigender Kupferbedarf auch in anderen Sektoren (z. B. der Energiewirtschaft) zu Knappheiten führen.

Abbildung 20: Kupfer im Pkw (2020 und 2030)

Der Kupferbedarf der Pkw (gezeigt in Abbildung 20) steigt durch die Hybridisierung bei den konventionellen Pkw 2030 gegenüber 2020 an. Auch in den Traktionsbatterien wird Kupfer eingesetzt, was zu dem deutlich höheren Kupferbedarf des Elektro-Pkw bzw. des Plug-in-Hybrid-Pkw führt.

Es zeigt sich also bei allen Fahrzeugkonzepten ein relevanter Einsatz kritischer Rohstoffe, der jedoch bei den alternativen Konzepten, insbesondere PHEV, BEV und FCEV, besonders groß ist. Die gezeigten Werkstoffbedarfe lassen sich teilweise mit einem konsequenten und effizienten Recycling reduzieren, auch wenn dabei Aufwand und Nutzen abzuwägen sind. Bei den Traktionsbatterien wird auch darüber diskutiert, inwiefern diese am Ende ihres ersten Lebens im Fahrzeug als stationärer Energiespeicher weiterbetrieben werden können. Dieser „Second-life“-Ansatz steht allerdings aktuell noch am Anfang der Entwicklung und wurde daher in den Bilanzen nicht berücksichtigt.

Nachhaltigkeitskriterien in den Lieferketten von Materialien sowohl im Bereich der Einhaltung von Menschenrechten als auch die Durchsetzung von Umweltstandards können dabei helfen, mögliche negative Wirkungen aus der weiterhin notwendigen Rohstoffgewinnung zu minimieren (Kämper et al. 2020).

4 Wirtschaftlichkeit

4.1 Methode der TCO-Berechnung

Für die Bewertung der ökonomischen Effizienz der Antriebe und Kraftstoffe wird eine Total Cost of Ownership (TCO)-Berechnung durchgeführt. Die TCO umfassen alle Kosten, die bei Erwerb, Nutzung und Entsorgung eines Guts, in diesem Fall von Pkw, über dessen gesamte Nutzungsdauer hinweg anfallen. Diese umfassende Vollkostenrechnung ist für einen adäquaten Vergleich verschiedener Antriebssysteme und Kraftstoffe erforderlich, da sich beispielsweise Anschaffungskosten und laufende Kosten der Alternativen teilweise deutlich unterscheiden. Eine TCO-Berechnung ermöglicht daher einen ganzheitlichen Kostenvergleich.

Hier in dieser Studie wird die TCO aus einer volkswirtschaftlichen Perspektive durchgeführt. Die hier vorliegende Studie geht von der Grundfrage aus, wie die motorisierte Individualmobilität mit Pkw optimal ausgestaltet sein sollte, um die energie- und klimapolitischen Ziele aus einer volkswirtschaftlichen Perspektive am sinnvollsten zu erreichen. Dabei geht es in erster Linie um die kostenbasierte Bewertung von alternativen Kraftstoffen und Antrieben. Da direkte und indirekte Steuern, Abgaben und Subventionen nur einen Transfer von Finanzmitteln zwischen Haushalten und Unternehmen sowie dem Staat darstellen, werden sie nicht als volkswirtschaftliche Kosten betrachtet. Dies bedeutet, dass die Anschaffungskosten und die Nutzungskosten (Energie, Wartung und Instandhaltung) und die Entsorgungskosten enthalten sind. Nicht inkludiert sind hingegen alle Subventionen, Abgaben, Umlagen und Steuern wie Umweltbonus, Mehrwertsteuer, Energiesteuer, Stromsteuer, CO₂-Steuer etc.

4.2 Vergleich der Wirtschaftlichkeit

4.2.1 Ergebnisse der Kostenanalyse für Pkw

In der Abbildung 21 sind die Ergebnisse der TCO-Rechnung für 2020 dargestellt. Man sieht, dass die konventionellen Antriebe am günstigsten sind und auch Biogas aus ökonomischer Perspektive sehr attraktiv ist. Die beiden BEV-Alternativen liegen etwas über den konventionellen Lösungen (zwischen 2.300 und 7.400 € höhere TCO), aber deutlich unterhalb denen von FCEV und Benzinern mit synthetischen Kraftstoffen. Die höheren Anschaffungskosten, die im Wesentlichen auf die Kosten für die Batterie zurückzuführen sind, können nur teilweise durch die geringeren Kraftstoff- und Wartungs-/Reparaturkosten kompensiert werden.

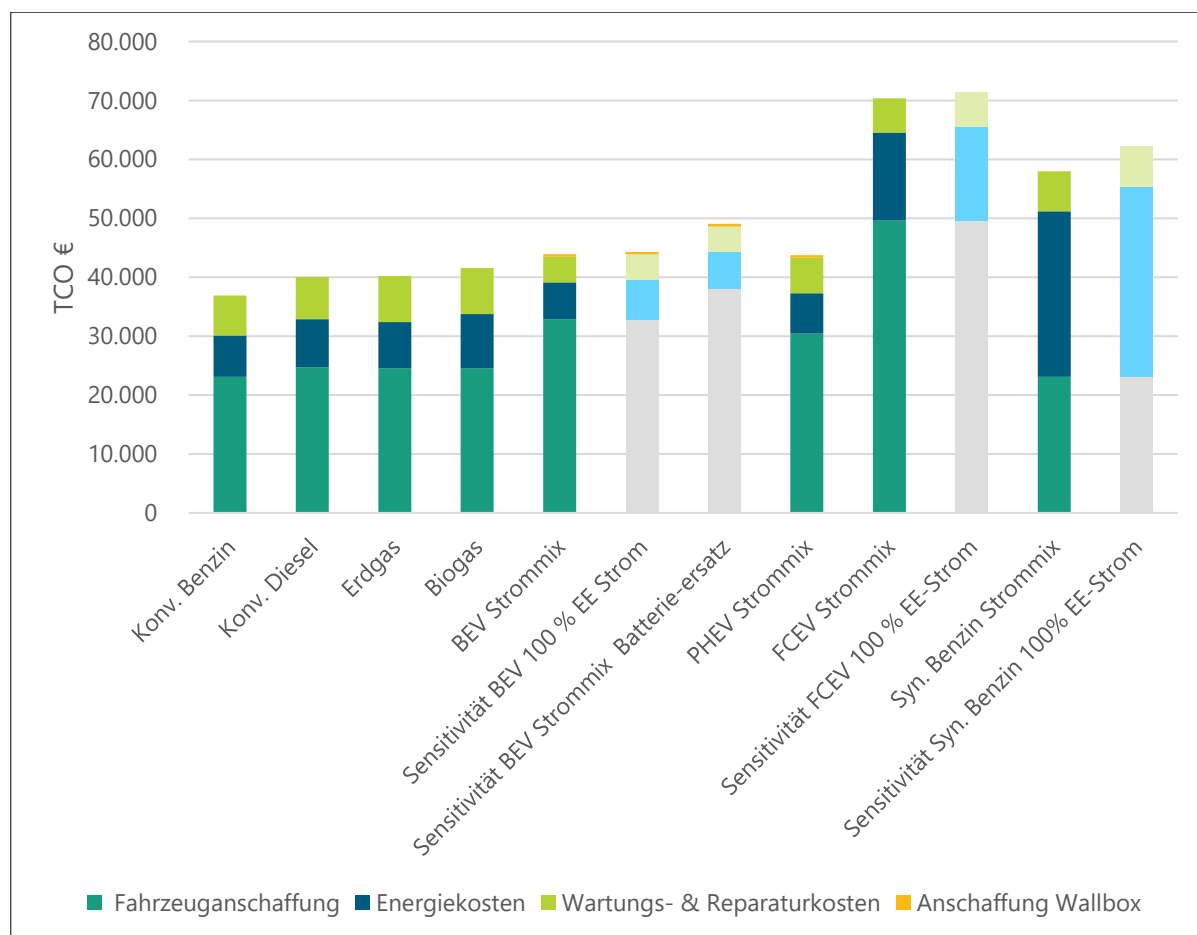
BEV bleiben auch dann gegenüber den anderen alternativen Kraftstoffen und Antrieben wirtschaftlich vorteilhaft, wenn man unterstellt, dass nach der Hälfte der Lebenszeit die Batterie ersetzt werden müsste.

Insbesondere wegen der hohen Fahrzeugkosten (Brennstoffzelle und Wasserstofftank), aber auch wegen der Kraftstoffkosten sind die FCEV-Alternativen sehr unattraktiv. Die hohen Kraftstoffkosten sorgen auch dafür, dass Pkw mit synthetischen Kraftstoffen ebenfalls wirtschaftlich sehr schlecht abschneiden.

Rechnet man mit 100 % erneuerbarem Strom, steigen die Kosten bei den BEV leicht an, während die höheren Kosten für den erneuerbaren Strom bei den FCEV und insbesondere den

synthetischen Kraftstoffen aufgrund der geringeren Effizienz der gesamten Umwandlungskette stärker durchschlagen.

Abbildung 21: TCO-Ergebnisse für einen in 2020 angeschafften Kompakt-Pkw



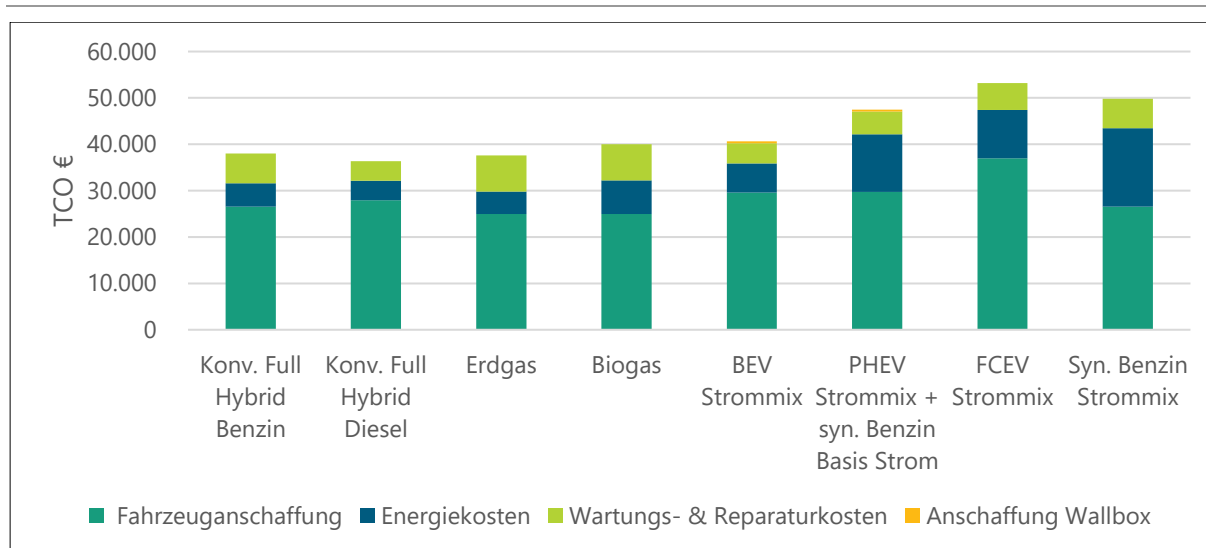
Im Jahr 2030 wird für die dann angeschafften Pkw nicht mehr zwischen den Kosten für Strommix und EE-Strom unterschieden, weil im zugrunde gelegten Energieszenario die Erneuerbaren stark dominieren und die Strompreise setzen. Beim PHEV wird anders als in 2020 unterstellt, dass der Verbrenner ausschließlich mit 100 % synthetischen Flüssigkraftstoff betrieben wird, um niedrige THG-Emissionen zu erreichen. Während in 2020 für den konventionellen Pkw noch keine Hybridisierung unterstellt wurde, wird eine Full-Hybridisierung für 2030 angenommen, um das mögliche Effizienzpotenzial aufzuzeigen.

Von den alternativen Lösungen liegen Biogas-Pkw und BEV nahezu gleichauf (siehe Abbildung 22). Bei den BEV sinken gegenüber 2020 die Anschaffungskosten, da die Batteriekosten annahmegemäß deutlich sinken und die unterstellte erhöhte Batteriekapazität dies nur teilweise wieder kompensiert.

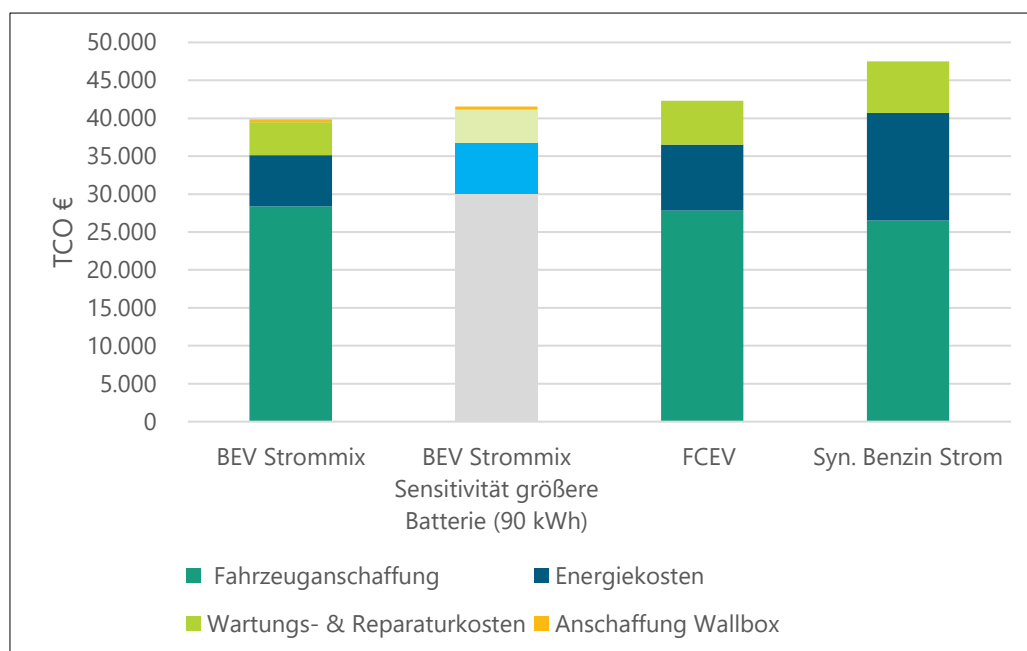
Gegenüber den BEV liegen die TCO vom PHEV doch recht deutlich darüber, was auf die erhöhten Kraftstoffkosten für den synthetischen Kraftstoff zurückzuführen ist. Unterstellt man, dass die PHEV mit konventionellem Kraftstoff fahren würden, dann würden die Energiekosten deutlich sinken. Die TCO des FCEV sinken gegenüber 2030 relevant, was an den niedrigeren Fahrzeuganschaffungskosten durch die angenommene Kostensenkung bei der Brennstoffzelle und dem Wasserstofftank liegt. Trotzdem weisen sie im Vergleich die höchsten TCO-Kosten aus.

Bei dem Benzinern mit synthetischen Kraftstoffen sinken die Kosten ebenfalls, was an den deutlich niedrigeren Kosten der Kraftstoffherstellung liegt. Die TCO liegt aber trotzdem noch über 20 % von denen eines BEV.

Abbildung 22: TCO-Ergebnisse für einen in 2030 angeschafften Kompakt-Pkw



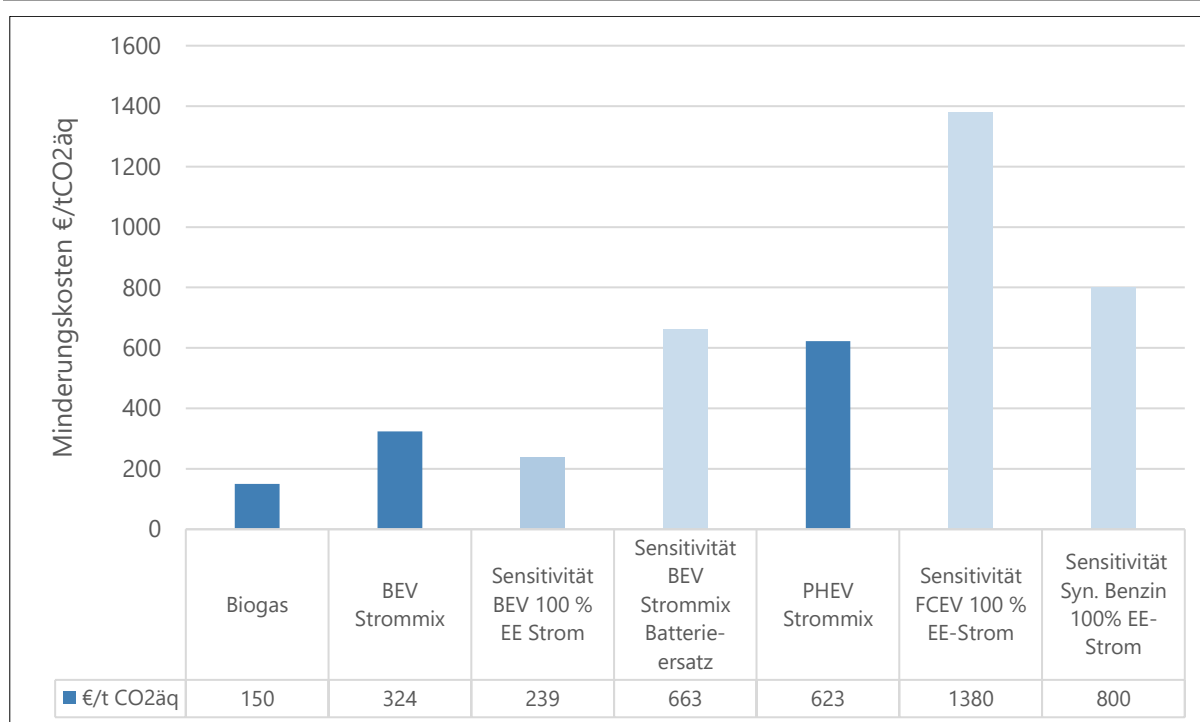
Um die Potenziale der Kostensenkung weiter auszuleuchten wird noch eine Berechnung für eine Fahrzeuganschaffung in 2040 durchgeführt. Wird auf ein in 2040 angeschafften Kompakt-Pkw geschaut, dann können unter den getroffenen Annahmen die FCEV ungefähr die Kostenparität zu den BEV erreichen (siehe Abbildung 23). Hier ist zu sagen, dass dabei eine deutliche Kostensenkung bei den FCEV sowie bei den Wasserstoff-Transport- und Tankstellenkosten unterstellt wurde, die nur bei Erreichung eines Massenmarktes derzeit als möglich zu erreichen eingestuft wird. Die Pkw mit synthetischen Kraftstoffen bleiben die teuerste Option, wenn auch die Kostendifferenz durch das unterstellte Absinken der Herstellkosten der Kraftstoffe deutlich geringer wird. Bei den BEV ändert eine größere unterstellte Batteriekapazität (90 kWh) und damit eine höhere reale Reichweite von rund 500 km die Ergebnisse kaum.

Abbildung 23: TCO-Ergebnisse für einen in 2040 angeschafften Kompakt-Pkw

4.2.2 Treibhausgasminderungskosten

Die Abbildung 24 zeigt die spezifischen Kosten für die Minderung von THG-Emissionen für ein in 2020 angeschafftes Pkw. Als Referenzfahrzeug wird dabei der konventionelle Benziner ausgewählt.

Biogas, gefolgt von BEV mit THG-Emissionen aus 100 % erneuerbarem Strom, sind die günstigsten Optionen. Dann folgen die BEV mit THG-Emissionen, die aus dem Strommix berechnet wurden. Wenn die Sensitivität des Batterieersatzes berechnet wird, dann steigen die Minderungskosten allerdings relevant und liegen etwas unterhalb der Höhe der Kosten von mit synthetischen Benzin betriebenen Verbrennern mit 100% erneuerbarem Strom gerechnet. Die höchsten Kosten weisen die FCEV mit 100 % EE-Strom aus. Die FCEV und die synthetischen Kraftstoffe für Pkw mit Verbrennungsmotor, bei dem die THG-Emissionen aus dem Strommix zugrunde gelegt werden, sind nicht in der Abbildung aufgeführt, da sie ja zu höheren THG-Emissionen im Vergleich zum Referenzfahrzeug führen und somit keine Option zur Minderung der THG-Emissionen darstellen.

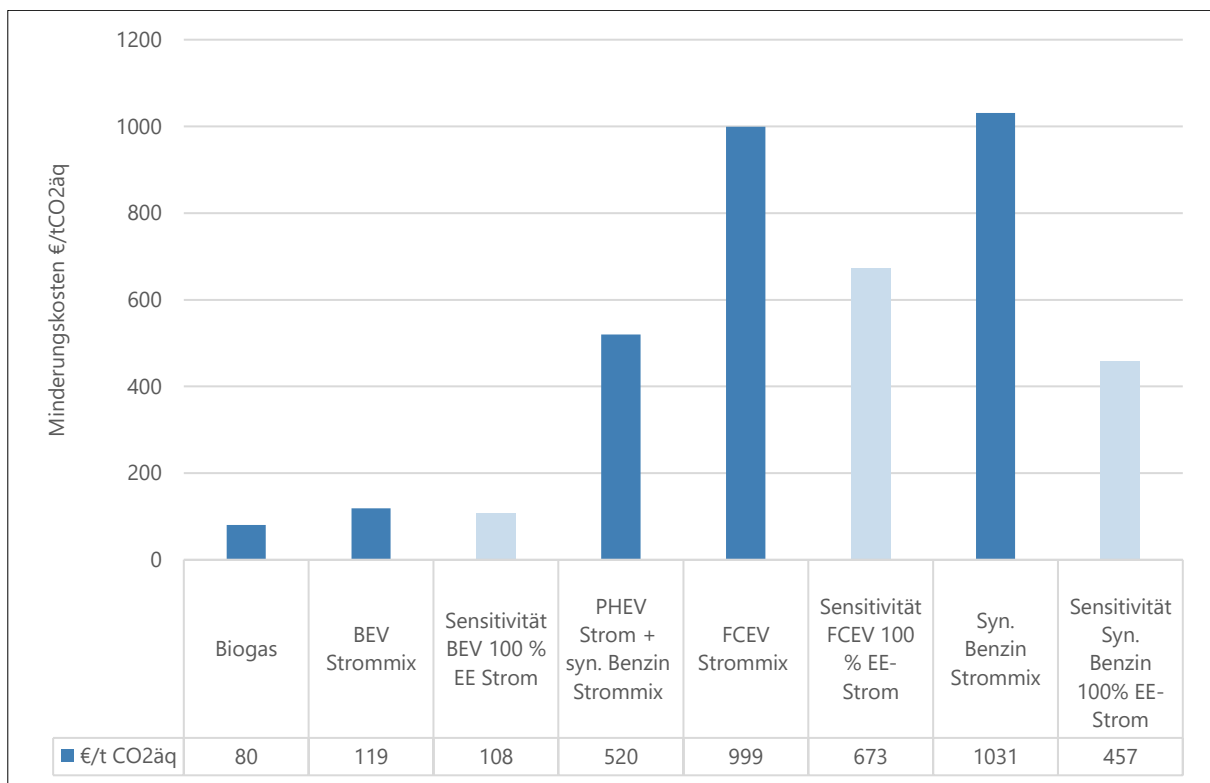
Abbildung 24: THG-Minderungskosten der alternativen Antriebe und Kraftstoffe gegenüber einem konventionellen Benziner im Jahr 2020

Für ein in 2030 angeschafftes Fahrzeug sinken die THG-Emissionen bei allen Alternativen deutlich (siehe Abbildung 25). Dies hängt u. a. damit zusammen, dass der unterstellte Strommix dann zu geringeren THG-Emissionen führt und auch die Fahrzeugherstellung mit immer geringeren THG-Emissionen belastet ist. Biogaseinsatz bei Gasfahrzeugen sowie BEV weisen die geringsten Minderungskosten gegenüber dem konventionellen Benziner aus (siehe Abbildung 25). Alle anderen Lösungen weisen deutlich höhere Minderungskosten auf.

Die Berechnungen beim PHEV führen aufgrund der Annahme, dass für Fahrten mit dem Verbrennungsmotor zu 100 % synthetische, strombasierte Kraftstoffe zum Einsatz kommen, zu vergleichsweise hohen Minderungskosten. Hier schlagen die hohen Kosten für die synthetischen Kraftstoffe durch. Diese sind auch ursächlich verantwortlich für die sehr hohen Kosten bei den mit synthetischen Kraftstoffen fahrenden Verbrennern. Wasserstoffkosten sowie die Fahrzeuganschaffung schlagen ebenfalls beim FCEV stark auf das Ergebnis durch. Mit THG-Emissionen aus der reinen Erneuerbaren-Erzeugung sinken die Kosten sowohl bei FCEV wie Verbrennern mit synthetischen Kraftstoffen deutlich, sie bleiben aber vergleichsweise hoch.

Nach der Novelle des Klimaschutzgesetzes werden die Preise für Emissionszertifikate staatlich festgelegt. Der Preis für eine Tonne CO₂ wird 2021 bei 25 Euro liegen und bis 2025 schrittweise auf 55 Euro pro Tonne steigen. 2026 sollen die Zertifikate erstmals in einem Preiskorridor von 55 bis 65 Euro versteigert werden. Vergleicht man diese Werte mit den THG-Minderungskosten so reichen sie nicht aus, um die Alternativen wirtschaftlich konkurrenzfähig zu gestalten. Unterstellt man allerdings einen Wert von 215 €/tCO₂äq, entsprechend der Externen Kostenhöhe nach Bünger et al. (2020) für 2030, dann ist ein derartiger Aufschlag ab 2030 für Biogaszfahrzeuge und BEV der Kompaktklasse ausreichend für eine Wirtschaftlichkeit.

Abbildung 25: THG-Minderungskosten der alternativen Antriebe und Kraftstoffe gegenüber einem konventionellen Benziner im Jahr 2030



5 Kritische Diskussion ausgewählter Aspekte

Eine große Quelle der Unsicherheit bezüglich der Klimabilanz liegt in der Entwicklung des Strommixes in Deutschland. Wenn die Minderung der Treibhausgase dort nach den Zielen des neuen Klimaschutzgesetzes (KSG) voranschreitet, haben BEV und PHEV gegenüber den konventionellen Pkw mit fossilen Kraftstoffen sehr deutliche Vorteile in der Klimabilanz. Aber auch wenn die Klimaziele im Stromsektor nur teilweise erreicht werden, haben BEV und PHEV immer noch nennenswerte Vorteile. Einige LCA-Studien halten aber die THG-Emissionen des Kraftwerksparks auf dem heutigen Niveau fest, was sich deutlich negativ auf die strombasierten Lösungen auswirkt. Es ist aber wenig realistisch, dass die einer derartigen Betrachtung zugrundeliegende Annahme, dass der Kraftwerkspark sich in den nächsten Jahren nicht ändern wird, tatsächlich eintreten wird.

Daneben stellt sich die Frage, ob man die THG-Emissionen des Grenzkraftwerkes, welches die letzte kWh Strom bereitstellt, anstelle der Durchschnittsemissionen des Kraftwerksparkes heranziehen soll. Unterstellt man dies, dann haben die BEV keine Klimavorteile bzw. können sogar schlechter abschneiden gegenüber den konventionellen Pkw. FCEV oder Verbrenner mit synthetischen Kraftstoffen sind aufgrund ihrer deutlich höheren Stromnachfrage wegen der hohen Konversionsverluste noch stärker betroffen, und sie liegen dann mit ihren THG-Emissionen deutlich über denen der konventionellen Pkw. Wie in Kapitel 3.2.2 ausführlich diskutiert, wird der Ansatz der Emissionen des Grenzkraftwerks nur dann als relevant angesehen, wenn man von einer statischen und kurzfristigen Betrachtung ausgeht. In der Realität wurde in der Vergangenheit und wird bei den aktuellen Zielen und Maßnahmen der erhöhte Strombedarf z. B. durch die Elektromobilität oder für grünen Wasserstoff bei den Ausbauzielen der Erneuerbaren und den Treibhausgasobergrenzen berücksichtigt. Weiterhin ist es methodisch kritisch, da die Wahl des Verursachers der letzten kWh Stromnachfrage willkürlich ist.

Ein weiterer wichtiger Aspekt für aktuelle Klimabilanzen von batterieelektrischen Fahrzeugen ist die schnelle Entwicklung bei den Batterietechnologien und der Batteriefertigung in den letzten Jahren. Dies führt dazu, dass Studien sehr schnell veralten und die Einschätzungen zur Klimabilanz von Traktionsbatterien sich stetig verändern. Während eine schwedische Metastudie im Jahr 2017 noch eine Bandbreite der Treibhausgasemissionen von 150 bis 200 kg CO₂-Äquivalenten pro kWh ausgewiesen hat, geht das Update von 2019 nur noch von einer Bandbreite von 61 bis 106 kg CO₂-Äquivalenten bzw. einem schlechtesten Fall von 146 kg CO₂-Äquivalenten aus (Emilsson et al. 2019). In diesen Zusammenhang ist zu erwähnen, dass auch der Ort der Batteriezellenherstellung aufgrund des regionalen Strommixes einen hohen Einfluss auf die Klimabilanz hat. In dieser Studie wurde für 2020 ein Mix an Produktionsorten, so wie er sich aktuell für in Europa verkaufte Fahrzeuge darstellt, gewählt.

Die Ergebnisse der Bewertung der Treibhausgasemissionen (THG) sowie der Wirtschaftlichkeit ist von vielen Parametern abhängig. Gerade deren zukünftige Entwicklung ist oftmals unsicher. Geringere Unterschiede in den Ergebnissen sollten deshalb nicht überinterpretiert werden und die Ergebnisse auch immer im Lichte der getroffenen Annahmen bewertet werden. Auch unterscheiden sich die Nutzungsprofile für die einzelnen Nutzer stark, was dann zu deutlich abweichenden Ergebnissen führen kann. Batteriefahrzeuge eignen sich heute z. B. von der Wirtschaftlichkeit und der THG-Bilanz nicht für Nutzer, die nur wenig fahren. Wenn hohe Batteriekapazitäten in schweren Fahrzeugen den Rechnungen zu Grunde gelegt werden, dann erhöht dies auch die THG-Emissionen bei diesen Pkw (siehe Wietschel et al. 2019a und Wietschel et

al. 2020a). Auch hat die gesamte Fahrleistung eines Fahrzeugs einen relevanten Einfluss. Wird diese hoch angesetzt, dann profitieren davon die BEV, da diese im Fahrbetrieb weniger Emissionen ausstoßen und der höhere Rucksack weniger ins Gewicht fällt. Wird nur oder überwiegend erneuerbarer Strom zur Herstellung von Wasserstoff verwendet so gilt dies auch für die FCEV.

Eine weitere relevante Größe der Unsicherheit ist die Kostenentwicklung bei den BEV, PHEV und insbesondere bei den FCEV. Während der Verbrennungsmotor seit mehr als hundert Jahren immer weiterentwickelt und optimiert wurde, stehen die neuen Antriebsalternativen noch am Anfang dieser Entwicklung. Abschätzungen der künftigen Entwicklung sind deshalb herausfordernd und eine Quelle der Unsicherheit. Aber möglicherweise bestehen durch neue Technologien, Produktionsverfahren und Massenfertigung hier noch große Kostensenkungspotenziale.

Bei den strombasierten synthetischen Kraftstoffen liegt eine große Unsicherheit in der Entwicklung der künftigen Herstellkosten, da sie bisher noch nicht in größeren Mengen hergestellt wurden. Hier geht es um die Weiterentwicklung von Technologien und einem Anlagen Scale-Up. Weiterhin gibt es relevante Unsicherheiten bezüglich der Herstell- und Transportkosten von synthetischen Kraftstoffen im Ausland.

Die vorliegende Studie bezieht sich bezüglich der Umweltauswirkungen ausschließlich auf die Klimabilanz, Luftschadstoffe und kritischen Rohstoffe verschiedener Fahrzeuge. Allerdings muss erwähnt werden, dass sich die Antriebssysteme auch bei anderen Umweltauswirkungen wie Flächennutzung oder Wasserentnahme unterscheiden (siehe beispielsweise Helms et al. 2016; Helmers et al. 2017; UBA 2018; Manzetti et al. 2015; Frischknecht et al. 2018; Hill et. al 2020).

So steht die Kraftstoffproduktion und somit auch die Biomethanerzeugung aus Anbaubiomasse aufgrund einer Reihe von Nachhaltigkeitsaspekten in der Diskussion, obwohl der Einsatz von Biomethan zu geringeren Treibhausgasemissionen als der Einsatz von Erdgas führen kann. Die Bewertung der Nachhaltigkeit ist komplex, und eine Reihe an Faktoren müssen berücksichtigt werden. Beispielsweise besteht eine Konkurrenz um fruchtbare Flächen, die neben dem Anbau von Pflanzen für die energetische Nutzung auch zum Anbau von Nahrungs- oder Futtermitteln genutzt werden können. Darüber hinaus kann eine verstärkte Nachfrage nach Anbaubiomasse für die energetische Nutzung zu indirekten Landnutzungsänderungen führen. Wird Anbaubiomasse durch eine intensive Landwirtschaft erzeugt, können außerdem negative Auswirkungen wie ein Verlust an Biodiversität oder eine Degradierung der Böden stattfinden. Gleichzeitig muss die Flächeninanspruchnahme für den Anbau von Substraten zur Biogas-erzeugung berücksichtigt und ein möglichst hoher Flächenertrag angestrebt werden.

Dagegen wird die Erzeugung von Biomethan aus Rest- und Abfallstoffen deutlich positiver bewertet, insofern Nachhaltigkeitskriterien (z. B. ausgeglichene Humusbilanz bei der Strohnutzung) eingehalten werden. Bei der Nutzung von Gülle kommt hinzu, dass der Einsatz in Biogasanlagen zu einer Verringerung der Treibhausgasemissionen führen kann. Insgesamt sind jedoch auch bei Rest- und Abfallstoffen im Einzelfall Nutzungskonkurrenzen sowie die räumlich sehr dezentrale Verfügbarkeit zu berücksichtigen.

Die Rohstoffverfügbarkeit bei Batteriefahrzeugen und Brennstoffzellenfahrzeugen wird oft kritisch diskutiert. Wie in Kapitel 3.8 gezeigt, sind insbesondere Kobalt und Lithium und bei Brennstoffzellenfahrzeugen Platin als kritisch einzustufen. Bei den kritischen Rohstoffen kann es zu Preissprüngen und Versorgungsengpässen kommen. Lösungsstrategien durch Verminderung

oder Substitution der kritischen Rohstoffe und Recyclingstrategien sind hier zu entwickeln (siehe Agora 2021 und Thielmann et al. 2020). In der Diskussion stehen auch die sozialen Abbaubedingungen in bestimmten Lieferländern wie Kobalt aus dem Kongo sowie die Eingriffe in Ökosysteme beim Rohstoffabbau (siehe Thielmann et al. 2020).

In dem Zusammenhang ist allerdings zu betonen, dass auch die Verfügbarkeit von günstigem Erdöl oder Erdgas eine Rohstofffrage ist, die von vielen Fachleuten als kritisch eingestuft wird, ebenso wie die sozialen Bedingungen in einigen der relevanten Lieferländern.

Bei den alternativen Antrieben sind auch mögliche Rebound-Effekte zu beachten. Mit Rebound-Effekt wird der Effekt bezeichnet, der dazu führt, dass das Einsparpotenzial von Effizienzsteigerungen nicht oder nur teilweise verwirklicht wird. Bei den alternativen Antrieben könnte ein tatsächlicher oder vermeintlich positiverer Umwelteffekt zur höheren Nutzung der Fahrzeuge führen. Hier fehlen allerdings bisher empirische Daten.

Weiterhin ist zu berücksichtigen, dass sich konventionelle Pkw und gerade E-Pkw in vielen Aspekten aus Kundensicht unterscheiden und deshalb nur bedingt vergleichbar sind. U. a. die höhere Reichweite, das größere Platzangebot und die schnellere Betankungszeit sprechen für den konventionellen Benzin-, Diesel- oder Gas-Pkw. Die bessere Beschleunigung, die geringeren Lärmemissionen, die geringeren NO_x- und Feinstaubemissionen, die drohende und zunehmend steigende Anzahl an Fahrverboten für konventionelle Fahrzeuge in Städten und ganzen Ländern sowie das Image eines innovativen, umweltfreundlichen Fahrzeugs sprechen hingegen für den E-Pkw.

Brennstoffzellenfahrzeuge weisen heute teilweise noch höhere Reichweiten als E-Pkw auf und sie haben deutlich schnellere Betankungszeiten, vergleichbar mit konventionellen Pkw. Bezüglich Beschleunigung und niedrigeren lokalen Emissionen sind sie vergleichbar mit E-Pkw.

Bei der wirtschaftlichen Bewertung ist zu betonen, dass eine rein kostenbasierte Betrachtung ohne Steuern, Umlagen und Fördermaßnahmen durchgeführt wurde. Integriert man diese Faktoren, dann kann sich das Ergebnis ändern. Bei der gewählten Methode der Total-Cost-of-Ownership ist darauf hinzuweisen, dass die Entscheidung zum Kauf eines Fahrzeugs in der Realität weder im privaten noch im gewerblichen Umfeld rein auf wirtschaftlichen und ökologischen Entscheidungskriterien basiert. Vielmehr bestimmen auch technische Fahrzeugcharakteristika wie beispielsweise Reichweite und Zuverlässigkeit, ebenso wie Verfügbarkeit von Infrastruktur sowie Marken- und Segmenttreue die Kaufentscheidung (Plötz et al. 2014). Darüber hinaus hat sich im privaten Umfeld gezeigt, dass häufig bezüglich wirtschaftlicher Kriterien keine „rationale“ Entscheidung getroffen wird, sondern dass die Anschaffungskosten die Entscheidung stärker beeinflussen und laufende Kosten vernachlässigt werden. Gerade für E-Pkw und BZ-Pkw stellen dies Hemmnisse bei der Kaufentscheidung dar.

Ein weiterer Diskussionspunkt ist, inwieweit sich eine Nutzerperspektive unterscheidet von der hier vorgenommenen volkswirtschaftlichen Bewertung. In Moll und Link (2021) wird aus Nutzersicht eine wirtschaftliche TCO-Bewertung vorgenommen. Diese schließt alle heute bestehenden Steuern, Abgaben und Fördermöglichkeiten sowie verschiedene Nutzergruppen und Fahrzeugsegmente ein. Die umfassende Betrachtung der Gesamtkosten zeigt, dass batterieelektrische Antriebe für Klein- und Kompaktwagen unter den aktuellen Bedingungen den günstigsten Antrieb aus Verbrauchersicht stellen. Schwere SUV mit batterieelektrischem Antrieb und hoher Reichweite sind dagegen heute wirtschaftlich weniger konkurrenzfähig. Hier stellt Biogas eine wirtschaftlich interessante Option dar. Die technische Weiterentwicklung der batterieelektrischen Antriebe legt nahe, dass sich bereits im Jahr 2030 höhere Anschaffungskosten auch ohne

Förderung im Verlauf der Haltedauer aus Nutzersicht amortisieren. Eine steigende Hybridisierung der Fahrzeuge fungiert als Brückentechnologie und führt lediglich zu einem Angleichen an die Ergebnisse der batterieelektrischen Antriebe. Daher stellt in Summe der batterieelektrische Antrieb die wirtschaftlichste Alternative aus Nutzersicht dar (vgl. Moll und Link 2021).

Ein zusätzliches Thema ist die Frage der Auswirkungen auf Arbeitsplätze. Trotz unterschiedlicher Beurteilungen der Beschäftigungseffekte in der Automobil- und Zulieferindustrie wird in Deutschland überwiegend ein nennenswerter Beschäftigungsrückgang in der Automobilwirtschaft durch die Elektromobilität erwartet¹⁰. Die Batteriezellproduktion selbst ist hochautomatisiert, weshalb die Arbeitsplatzeffekte limitiert sind. In Bezug auf die vor- und nachgelagerten Wertschöpfungsketten sind die sich daraus ergebenden Arbeitsplatzeffekte jedoch relevant. In anderen Bereichen wie der Stromerzeugung oder dem Aufbau der Ladeinfrastruktur dürfte es zudem positive Arbeitsplatzeffekte geben, die die Verluste in der Automobilwirtschaft kompensieren könnten. Vom Strukturwandel betroffene Regionen und Unternehmen, die im Kontext des verbrennungsmotorischen Antriebsstrangs aktiv sind, müssen ein nachhaltiges Geschäfts- und Beschäftigungsmodell entwickeln. Gegebenenfalls müssen sie dabei durch aktive industrie- und arbeitsmarktpolitische Maßnahmen unterstützt werden, damit – im Verbund mit natürlicher Altersfluktuation – der Strukturwandel sozialpolitisch verträglich gestaltet werden kann (siehe Thielmann et al. 2020).

¹⁰ siehe Bauer et al (2018), Institut für Arbeitsmarkt- und Berufsforschung (2018), DLR et al. (2019), European Climate Foundation (2018); Wietschel et al. (2017); Thielmann et al. 2020

6 Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

Ziel der vorliegenden Studie ist es, eine ökonomische wie ökologische Bewertung für alternative Kraftstoffe und Antriebe bei Pkw vorzunehmen. Dabei wird diese für Fahrzeuge durchgeführt, die in 2020 oder 2030 in Deutschland angeschafft und in den Folgejahren genutzt werden. Quantitative Analysen werden dabei für Fahrzeuge der Kompaktklasse angefertigt, und die Alternativen werden untereinander und mit konventionellen Benzinern (als Referenzfahrzeug), Diesel- und Erdgasfahrzeugen verglichen. Da die Zielsetzung der Studie ist, politischen Entscheidungsträgern Handlungsempfehlungen aufzuzeigen, werden bei der wirtschaftlichen Bewertung Kosten ohne Steuern, Abgaben und Subventionen angesetzt. Methodisch werden alle Kosten nach dem Total-Cost-of-Ownership-Ansatz bewertet. Die ökologische Bewertung erfolgt nach der Life-Cycle-Assessment-Methodik, bei der alle Emissionen der Produktions-, Nutzungs- und Entsorgungsphase erfasst werden.

Bei der Bewertung der ökologischen Wirkungen hat die unterstellte Stromerzeugung in den nächsten Jahren den größten Einfluss auf die Ergebnisse zur Klima- und Luftschadstoffbilanz. In der Studie wird unterstellt, dass die aktuellen klimapolitischen Ziele der Novelle des Klimaschutzgesetzes (KSG) eingehalten werden und somit das Stromsystem entsprechend schnell umgebaut wird. Es ist eine Besonderheit dieser Studie, dass damit erstmals die Auswirkungen der neuen deutschen Klimaziele auf die verschiedenen alternativen Antriebe detaillierter analysiert werden. Gleichzeitig ist aufgrund der Ziele für den Verkehr im Klimaschutzgesetz der Handlungsdruck groß, schnell umweltfreundliche alternative Antriebe in erheblichen Mengen in den Bestand zu bringen.

Methodisch werden die Durchschnittsemissionen des Kraftwerksparks angesetzt, wobei dabei allerdings die Auswirkungen von einer zusätzlichen Stromnachfrage durch die alternativen Antriebe berücksichtigt werden. Dies hat sich in der wissenschaftlichen Bewertung von alternativen Antrieben und zur Ableitung von Politikempfehlungen heute weitgehend durchgesetzt. Einzelne LCA-Studien rechnen aber mit den Grenzemissionen (Emissionen für eine zusätzlich nachgefragte kWh Strom). Dann kann die Treibhausgas (THG)-Bilanz von BEV (batterieelektrische Pkw) sowie insbesondere von FCEV (Brennstoffzellenfahrzeugen) und Benzinern mit synthetischen Kraftstoffen in den nächsten Jahren relevant schlechter ausfallen, solange noch konventionelle Kraftwerke sich im Stromsystem befinden und diese die zusätzliche kWh erzeugen. Andere Studien rechnen mit 100 % erneuerbarem Strom für die alternativen Antriebe, was ebenfalls methodisch kritisch zu reflektieren ist, weil diese eine Zusätzlichkeit der Stromproduktion aus Erneuerbaren unterstellt¹¹. Um aber die Potenziale der betrachteten Alternativen aufzuzeigen, werden – neben dem Ansatz, die durchschnittlichen THG-Emissionen aus dem Kraftwerkspark zu wählen – auch alternativ die Emissionen aus einer rein Erneuerbaren-Stromproduktion für die Nutzungsphase der Pkw bilanziert. Damit wird auch die langfristige Perspektive einer treibhausgasneutralen Stromproduktion in Deutschland als Ziel für 2045 aufgezeigt, mit der diese Betrachtung zunehmend konvergiert.

Alle untersuchten Alternativen zu den konventionellen Kraftstoffen und den konventionellen Pkw bieten mittelfristig (2030) ein relevantes Potenzial zur Minderung der Treibhausgase während der Nutzungsphase. Wird dieses Potenzial genutzt, rückt künftig immer mehr die Herstel-

¹¹ siehe hierzu die ausführliche Diskussion in Agora (2021)

lung der Pkw in den Fokus. Hier bieten sich für alle Pkw-Antriebe noch signifikante THG-Minderungspotenziale. So beispielsweise bei der Herstellung von Stahl, z. B. durch den Einsatz von grünem Wasserstoff bei der Hochofenstahlherstellung oder verstärkter Einsatz von Sekundärstahl. Aber auch bei der Herstellung von Flachglas oder Chemierohstoffen, die im Pkw zum Einsatz kommen, existieren nennenswerte THG-Minderungspotenziale. Die Politik sollte deshalb stärker die Pkw-Herstellung in den Blick nehmen¹².

BEV sind heute noch nicht wirtschaftlich und weisen kurzfristig noch recht hohe Vermeidungskosten von 240 €/tCO₂äq bei Verwendung von 100 % erneuerbarem Strom während der Nutzungsphase bzw. 320 €/tCO₂äq bei Berechnung mit THG-Emissionen aus dem deutschen Strommix auf. Sie werden aber u. a. durch die unterstellten sinkenden Batteriepreise, die nur teilweise wieder durch die unterstellten größeren Batteriekapazitäten aufgrund höherer Reichweitenanforderungen kompensiert werden, künftig recht zeitnah günstiger. Sie sind kurz-, mittel und langfristig auch die günstigste Option aller betrachteten Alternativen, außer einem Biogaseinsatz in Verbrennungsmotoren. Neben PHEV (Plug-in-Hybriden) sind sie ebenfalls die einzige Option, die kurzfristig in kommerziellen Stückzahlen zur Erreichung der 2030-Ziele des KSG im Verkehr zur Verfügung stehen. Da derzeit noch eine gewisse Unsicherheit bezüglich des Alterungsverhalten der Batterie herrscht, wurde noch eine Sensitivität mit einem kompletten Batterietausch kalkuliert. Hier steigen die Minderungskosten deutlich auf 760 €/tCO₂äq an.

BEV haben heute schon deutliche Klimavorteile gegenüber konventionellen Lösungen (für ein heute angeschafftes Fahrzeug über die Lebensdauer beim Strommix von ~46 %), wenn die Energiewende wie geplant voranschreitet und nach der Novelle des KSG notwendig ist. Selbst im eher wenig wahrscheinlichen Falle eines Batterietausches liegt er noch bei knapp 40%.

Die unterstellten THG-Emissionen aus der Stromerzeugung haben den größten Einfluss auf die Klimabilanz der BEV. Der Vorteil wird dann in der Zukunft immer höher werden (für ein in 2030 angeschafftes Fahrzeug beträgt er rund ~57 %). Wird der Umstand ausgenutzt, dass BEV gesteuert beladen werden, was sich recht einfach umsetzen lässt, dann erhöht sich der Klimavorteil weiter. Hierfür sollten die entsprechenden Rahmenbedingungen gesetzt werden.

Da die BEV derzeit einen höheren ökologischen Rucksack in der Herstellung haben und auch bei den Anschaffungskosten höher liegen als konventionelle Pkw, ist es wichtig, dass BEV möglichst intensiv genutzt werden. Z. B. bieten sich hier im Sharingbereich interessante Möglichkeiten¹³.

Weiterhin sollte der ökologische Rucksack in der Herstellung durch die Batterieproduktion gesenkt werden. Hier gibt es signifikante Minderungspotenziale¹⁴. So kann der Energieverbrauch in der Batteriezellenproduktion, die alleine für 20 bis 50 % der Treibhausgasemissionen während der gesamten Batterieherstellung verantwortlich ist, mit bereits bekannten Technologien und Verfahren zukünftig um bis zu 50 % gesenkt werden. Zusätzlich bietet auch die Verwendung von erneuerbarem Strom bei der Batterieherstellung gute Möglichkeiten zur THG-Senkung. Hier sollte die Politik die entsprechenden Regularien setzen.

¹² in VDI (2020) wird dies auch gefordert

¹³ siehe auch Doll et al. 2021

¹⁴ siehe Agora 2021

PHEV können ebenfalls einen Beitrag zur Senkung der THG-Emissionen leisten, und sie sind in den nächsten Jahren wirtschaftlicher als FCEV und Verbrenner mit synthetischen, strombasierten Kraftstoffen. Sie bieten gegenüber konventionellen Benzinern aber nur eine deutlich bessere Klimabilanz, wenn hohe elektrische Fahranteile erreicht werden (mindestens 40 %). Gerade im Dienstwagenbereich sind die derzeitigen Anreize für die Fahrzeugnutzer jedoch so gesetzt, dass sie i.d.R. kaum auf nennenswerte elektrische Fahranteile kommen¹⁵ – einschränkend ist zu sagen, dass hier die Datenbasis noch schwach ist. Die politischen Anreizsysteme zum PHEV-Kauf sollten deshalb so gestaltet werden, dass relevante elektrische Fahranteile sichergestellt werden. Dazu gehört auch, dass die Batterien eine vernünftige Größe haben, die reale Reichweiten von 60 bis 90 km bieten. Da die Klimaschutzziele es notwendig machen, dass der Verbrennungsmotor von PHEV mittel- und langfristig ausschließlich mit synthetischen Kraftstoffen betrieben wird, verschlechtert sich allerdings die Wirtschaftlichkeit der PHEV gegenüber BEV deutlich. Dies liegt an den hohen Kosten der synthetischen Kraftstoffe. Somit sind PHEV eher als Übergangslösung einzuordnen¹⁶. Eine Förderung sollte deshalb immer den Aspekt vor Augen haben, ob sich hier nicht langfristig eine technologische Sackgasse ergeben könnte.

Synthetische Kraftstoffe für Verbrennungsmotoren sind weder heute noch in absehbarer Zukunft wegen der hohen Kraftstoffkosten wirtschaftlich. Eine Ausnahme stellen Pkw mit sehr geringer Gesamtjahresfahrleistung dar, bei denen sich die höheren Anschaffungskosten in BEV, PHEV oder FCEV nicht rechnen¹⁷. Synthetische Kraftstoffe können allerdings zur Erreichung von strengeren Klimaschutzzielen kurz- und mittelfristig einen Beitrag leisten, da sie anders als die anderen betrachteten Alternativen im Fahrzeugbestand eingesetzt werden können. Aber dabei sind die hohen CO₂-Vermeidungskosten zu beachten: 2020 von 800 €/t CO₂äq. bei einem Kompakt-Pkw. Weiterhin gilt dies nur unter der Voraussetzung, dass der Strom ausschließlich oder zumindest überwiegend aus erneuerbaren Quellen stammt. Bei Berechnungen mit THG-Emissionen aus dem Strommix haben sie sogar eine schlechtere Bilanz als die konventionellen Verbrenner. Eine ausschließlich oder überwiegend auf erneuerbaren Strom basierende Herstellung sollte deshalb sichergestellt werden. Die Herstellung von synthetischen Kraftstoffen erfordert aber einen vergleichsweise hohen Ausbau an erneuerbarer Energie, da sie gegenüber BEV ca. den vier- bis fünffach höheren Strombedarf haben. Dies ist aufgrund der beschränkten wirtschaftlichen Potenzialen an Erneuerbaren in Deutschland kritisch zu bewerten. Es wirft auch Fragen der Akzeptanz auf, da der Erneuerbaren-Ausbau sowie der damit verbundene Ausbau an Stromtransport- und -verteilungsnetzen entsprechend hoch ist. Synthetische Kraftstoffe müssten deshalb in größeren Mengen in anderen Ländern mit günstigen klimatischen Voraussetzungen erzeugt und nach Deutschland importiert werden¹⁸. Bei möglichen Importen stellen sich Herausforderungen in Bezug auf soziale, politische und ökologische Nachhaltigkeitskriterien¹⁹. Es ist auch zu diskutieren, ob die Erneuerbaren-Stromerzeugung ggf. effizienter in der Defossilierung der Stromerzeugung in den Erzeugerländern eingesetzt werden könnte, die oftmals selber noch eine hohe Stromproduktion auf fossiler Basis haben.²⁰

¹⁵ siehe Plötz et al. 2020 und NPM 2020

¹⁶ Nach Sieves et al. 2021 haben gerade deutsche Pkw-Hersteller hier eine gute Marktposition.

¹⁷ siehe BMWi (2021)

¹⁸ Ausführlich diskutiert wird die Thematik in Wietschel et al. 2020.

¹⁹ siehe Wietschel et al. (2020b)

²⁰ siehe Wietschel et al. (2020b)

Zu bedenken ist ebenfalls, dass der Aufbau von notwendigen Erzeugungsanlagen und Transportinfrastrukturen zeit- und kapitalintensiv ist. Und es besteht eine harte Nutzungskonkurrenz zu anderen Einsatzgebieten von grünem Wasserstoff und seinen Syntheseprodukten in Deutschland, beispielsweise in der Eisen- und Stahlindustrie oder der Grundstoffindustrie. Diese sind wegen oftmals fehlender Alternativen mit einer deutlich höheren Notwendigkeit auf grünem Wasserstoff und seinen Syntheseprodukten zur Dekarbonisierung angewiesen²¹. Deshalb wird der mögliche Einsatz von synthetischen Kraftstoffen bei Pkw in nennenswerten Umfang aus heutiger Perspektive eher als unwahrscheinlich eingestuft.

FCEV sind kurz- und mittelfristig u.a. wegen der hohen Anschaffungspreise noch sehr teuer und weisen somit hohe Minderungskosten für THG-Emissionen auf (2030 beim unterstellten Strommix von rund 1000 €/tCO₂äq). Sie haben aber langfristig (um 2040) das Potenzial, wirtschaftlich zu werden und in die Kostenparität zu BEV zu kommen. Gerade bei hohen Reichweitenanforderungen und schweren Pkw bieten sie sich an. Hohe Reichweitenanforderungen von über 500 km ohne Zwischenladung mit BEV zu erfüllen, ist nach heutigen Wissenstand und nach heutigen und künftig absehbaren Batterietechnologien herausfordernd, weil dies mit hohen Batteriekapazitäten bei gleichzeitig beschränktem Bauraum im Fahrzeugunterboden einhergeht. Dies beeinflusst die Wirtschaftlichkeit und die Umweltbilanz negativ. Um allerdings wirtschaftlich interessant zu werden, müssen bei den FCEV die Kosten der Brennstoffzelle und des Wasserstofftanks deutlich gesenkt und die Lebensdauer der Brennstoffzelle (BZ) erhöht werden. Da derzeit der deutsche und europäische Markt kaum auf FCEV setzt, könnte dies über asiatische Märkte getrieben werden. Hier sind die künftigen Entwicklungen zu beobachten, gerade auch wegen der Relevanz dieser Märkte für deutsche Pkw-Hersteller.

Eine weitere Herausforderung besteht in der Kostensenkung der Verteil- und Tankstelleninfrastruktur für Wasserstoff, da diese sehr kapitalintensiv ist²². Erst bei größeren Wasserstoffabsatzmengen rechnet sich hier ein Aufbau. Evtl. könnten sich Synergien durch die Einführung von BZ-Lkw oder Lkw mit Wasserstoffverbrennungsmotoren ergeben, die zurzeit in der Diskussion stehen.

FCEV haben nur Klimavorteile in der Nutzungsphase gegenüber konventionelle Pkw, wenn der Strom ausschließlich oder zumindest überwiegend aus erneuerbaren Stromquellen stammt. Deshalb ist eine echte Zusätzlichkeit des erneuerbaren Stroms zur Wasserstoffherstellung sicherzustellen, was jedoch unter wirtschaftlichen Aspekten herausfordernd ist. Da sie weiterhin gegenüber BEV einen schlechteren Gesamtwirkungsgrad haben, ist der Bedarf an Erneuerbaren größer (ca. den Faktor 2 bis 2,5). Hier stellen sich ähnliche Fragen wie sie oben schon bei synthetischen Kraftstoffen aufgeworfen wurden.

Die Erzeugung von Wasserstoff über die Wasserelektrolyse kann gesteuert nach Verfügbarkeit von Erneuerbaren gefahren werden und damit können die THG-Emissionen gesenkt werden. Dieses sollte man ausnutzen und die politischen Rahmenbedingungen entsprechend setzen. Allerdings sind dem Grenzen gesetzt, da die Elektroyseanlagen kapitalintensiv sind und sie deshalb aus wirtschaftlichen Gründen auf recht hohe Betriebsstunden kommen müssen. Die Verwendung von sogenannten Überschussstrom (Erzeugung übersteigt Nachfrage) reicht heute und den Prognosen nach auch künftig bei weitem nicht für einen wirtschaftlichen Anlagenbetrieb aus. Die richtige Balance zwischen ökologischen und ökonomischen Anforderungen ist hier zu finden.

²¹ siehe Wietschel et al. 2021, Ausfelder et al. 2018, Nationaler Wasserstoffrat 2021, SRU 2021

²² siehe z. B. Robinius (2018)

Ähnlich den BEV ist die Herstellung bei den FCEV energieintensiv und damit i.d.R. mit hohen THG-Emissionen verknüpft. Verantwortlich hierfür ist die Herstellung der Brennstoffzelle sowie auch des Wasserstofftanks. Maßnahmen zur Senkung der Herstellemission müssen deshalb vorangetrieben werden.

Zu strengeren Klimaschutzzielen in 2030 in Deutschland werden FCEV keinen nennenswerten Beitrag leisten können, weil der Markthochlauf bis dahin selbst unter optimistischen Annahmen sehr begrenzt sein wird (optimistische Szenarien gehen von wenigen hunderttausend FCEV im Bestand bis 2030 aus²³). Wenn in Deutschland und der EU grüner Wasserstoff produziert und eingesetzt wird, dann voraussichtlich zuerst für Anwendungen in der Industrie (stoffliche Nutzung) und im Flugverkehr (als Derivat), evtl. noch im Schwerlastverkehr, Zugverkehr oder bei Bussen.²⁴

Zusammenfassend lässt sich zu FCEV bilanzieren, dass sie als künftige Technologieoption bei Pkw von der Politik unterstützt werden sollten, aber ein schneller Markteintritt in Deutschland sollte nicht vorangetrieben werden.

Biogas als Kraftstoff für Pkw ist sowohl ökonomisch wie ökologisch, wenn entsprechende Nachhaltigkeitskriterien beachtet werden, eine sinnvolle Option. Allerdings sind die Potenziale von nachhaltiger Biomasse beschränkt²⁵. Weiterhin sollte die Nutzungskonkurrenz zu anderen Sektoren, wie dem Einsatz im internationalen Flugverkehr, beachtet werden. Diese haben zum Teil deutlich weniger Alternativen zur Minderung der Treibhausgase²⁶. Weiterhin setzen die deutschen OEM aktuell immer weniger auf Gas-Pkw. Die Anzahl an angebotenen Modellen ist rückläufig, die Anzahl der Gastankstellen geht zurück und die Akzeptanz von Gas-Pkw ist in der deutschen Bevölkerung weiterhin gering. Derzeit haben sie nur einen Marktanteil im Bestand von 1 %.²⁷ Ob es sich hier lohnt zu versuchen, den Trend zu drehen, ist kritisch zu reflektieren, zumal sich durch die begrenzten Potenziale nur ein kleiner Teil der Pkw-Flotte mit nachhaltigem Biogas versorgen ließe. Evtl. kommen sie als kurzfristige Option zur Erreichung der Klimaschutzziele im Pkw-Verkehr bis 2030 in Frage, aber mit einem beschränkten Beitrag. Die Politik sollte eine Strategie entwickeln, in welchen Sektoren der Einsatz von nachhaltiger Biomasse am sinnvollsten ist und dann die entsprechenden Rahmenbedingungen setzen.

Im Sinne einer ganzheitlichen Umweltbewertung sollten neben der Klimabilanz die Auswirkungen in anderen Bereichen ebenfalls betrachtet werden. Eine Problemverlagerung in andere Umweltbereiche durch den Klimaschutz ist zu vermeiden. BEV, PHEV und FCEV sind im Vergleich zu den konventionellen Antrieben besonders kritisch beim nicht regenerativen abiotischen Ressourcenverbrauch, den Mineralien und Metallen. Bei BEV und PHEV sind es Lithium und Kobalt, bei FCEV die Platingruppenmetalle. Weiterhin ist der hohe Kupfereinsatz kritisch zu sehen. Der Einsatz von Kobalt, aber auch der Einsatz von Lithium wurde in der Vergangenheit bereits reduziert, und hier bieten sich durch neue Zelltypen weitere Potenziale an, den

²³ siehe die Metastudie zu verschiedenen Szenarien in Wietschel et al. 2021 und die Szenarien in BMWi (2021)

²⁴ siehe Wietschel et al. 2021

²⁵ Je nach Annahmen für das zur Verfügung stehende Potenzial könnten zwischen ca. 2,8 bis zu 8,8 Mio. Pkw aus Biogasanlagen und 2,4 bis 4,8 Mio. Mittelklasse-Pkw durch Biomethan betrieben werden, das aus den fortschrittlichen Rohstoffen Stroh, Gülle/Mist und weiteren Rest- und Abfallstoffen erzeugt werden (siehe Wietschel et al. 2019c)

²⁶ siehe Wietschel et al. 2021

²⁷ siehe BMWi (2021)

Einsatz zu verringern oder gar komplett darauf zu verzichten. Weiterhin sollte das Recycling der Batterien konsequent ausgebaut werden. Alternativ bietet sich noch eine Zweitnutzung der Batterien für stationäre Anwendungen an, wenn ihre Restkapazität – typischerweise 70 bis 80 % – für mobile Anwendungen nicht mehr ausreicht.

Im Bereich der Humantoxizität liegen diese Lösungen auf der Höhe der konventionellen Antriebe.²⁸ In anderen relevanten Umweltkategorien, insbesondere des kumulierten Energieverbrauchs, schneiden BEV, PHEV und FECV hingegen vergleichsweise gut ab.

Synthetische Kraftstoffe haben wie oben erwähnt nur einen nennenswerten Vorteil bei der Klimabilanz, wenn sie überwiegend aus erneuerbarem Strom hergestellt werden; kritisch bleiben bei diesen dann insbesondere der Flächen-, Wasser- und Energieverbrauch²⁹.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass die gesetzten politischen und nach aktuellen wissenschaftlichen Erkenntnissen notwendigen Klimaschutzziele in Deutschland für den Pkw-Verkehr, wenn man diesen nicht drastisch reduzieren will, ein sehr schnelles Handeln erforderlich machen. Dies wird überwiegend durch einen Antriebswechsel auf die batterieelektrische Mobilität in Deutschland bis 2030 und darüber hinaus erreicht werden können. Diese steht heute schon in größerem Umfang kommerziell zur Verfügung. Sie ist die wirtschaftlichste und energieeffizienteste der aktuell zur Verfügung stehenden Minderungsoptionen mit hohem Potenzial und kann somit schnell einen relevanten Beitrag zur Senkung der Treibhausgasemissionen leisten. Die Herausforderung besteht hierbei darin, dass der Geschwindigkeit der Marktdurchdringung gewisse Grenzen gesetzt sind, u. a. durch die Entwicklung von neuen Fahrzeugmodellen, dem Aufbau von Produktionskapazitäten und der privaten und öffentlichen Ladeinfrastruktur. PHEV können eine Brückenfunktion einnehmen. Andere Optionen, insbesondere Biogas und auch synthetische Kraftstoffe, können durch Potenzialbegrenzungen (Biogas und synthetische Kraftstoffe) und hohen Kosten (synthetische Kraftstoffe) höchstens in geringem Umfang bis 2030 zu einer Senkung der THG-Emissionen im Pkw-Verkehr beitragen. Langfristig (nach 2030) könnten noch Brennstoffzellen-Pkw eine Ergänzung zu den Batteriefahrzeugen darstellen.

²⁸ siehe Hill et. al 2020

²⁹ siehe UBA 2020

7 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Szenario der spezifischen CO ₂ -Emissionen des Kraftwerksmix in Deutschland für 2030 (eigene Daten für das Szenario TN-Strom aus der Studie BMWi 2021)	20
Abbildung 2:	Direkte und indirekte Luftschadstoffemissionen durch die Strombereitstellung	21
Abbildung 3:	Modularer Aufbau des eLCAR-Modells für die Pkw-Herstellung	25
Abbildung 4:	Treibhausgasemission der Pkw-Herstellung und Entsorgung 2020 im Detail	26
Abbildung 5:	Treibhausgasemission der Pkw-Herstellung und Entsorgung 2020 und 2030	27
Abbildung 6:	Treibhausgasemissionen der Fahrzeugbatterien 2020 (NMC622) und 2030 (NMC811) im Detail.....	28
Abbildung 7:	Stickoxidemissionen der Pkw-Herstellung und Entsorgung 2020 und 2030	29
Abbildung 8:	Feinstaubemissionen (PM ₁₀) der Pkw-Herstellung und Entsorgung 2020 und 2030.....	30
Abbildung 9:	PM ₁₀ - und NO _x -Auspuffemissionen von Euro 6d Pkw nach TREMOD 6.16.....	31
Abbildung 10:	THG-Emissionen für einen in 2020 angeschafften Kompaktklasse-Pkw.....	32
Abbildung 11:	Abweichung der THG-Emissionen gegenüber einem konventionellen Benziner für ein in 2020 angeschaffter Kompakt-Pkw.....	33
Abbildung 12:	THG-Emissionen für einen in 2030 angeschafften Kompaktklasse-Pkw.....	34
Abbildung 13:	Abweichung der THG-Emissionen gegenüber einem konventionellen Benzin-Kompaktklasse-Pkw für einen in 2030 angeschafften Pkw.....	35
Abbildung 14:	NO _x -Emissionen für einen in 2020 angeschafften Kompaktklasse-Pkw.....	36
Abbildung 15:	NO _x -Emissionen für einen in 2030 angeschafften Kompaktklasse-Pkw.....	37
Abbildung 16:	PM ₁₀ -Emissionen für einen in 2020 angeschafften Kompaktklasse-Pkw.....	38
Abbildung 17:	PM ₁₀ -Emissionen für einen in 2030 angeschafftes Kompaktklasse-Pkw.....	38
Abbildung 18:	Lithium und Kobalt im Pkw (2020 und 2030)	39
Abbildung 19:	Platingruppenmetalle im Pkw (2020 und 2030)	40
Abbildung 20:	Kupfer im Pkw (2020 und 2030).....	41
Abbildung 21:	TCO-Ergebnisse für einen in 2020 angeschafften Kompakt-Pkw.....	43
Abbildung 22:	TCO-Ergebnisse für einen in 2030 angeschafften Kompakt-Pkw.....	44
Abbildung 23:	TCO-Ergebnisse für einen in 2040 angeschafften Kompakt-Pkw.....	45
Abbildung 24:	THG-Minderungskosten der alternativen Antriebe und Kraftstoffe gegenüber einem konventionellen Benziner im Jahr 2020.....	46
Abbildung 25:	THG-Minderungskosten der alternativen Antriebe und Kraftstoffe gegenüber einem konventionellen Benziner im Jahr 2030.....	47

8 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Technische Fahrzeugparameter Kompaktklasse in Anlehnung an BIT et al. 2021	11
Tabelle 2:	Ökonomische Fahrzeugparameter Kompaktklasse (ohne Steuern, real) in Anlehnung an BIT et al. 2021	12
Tabelle 3:	Reale Kraftstoff- und Strompreise (ohne Steuern und Abgaben)	13
Tabelle 4:	Vorkettenemissionen und direkte Emissionen fossiler Kraftstoffe.....	22
Tabelle 5:	Wirkungsgrade bei der Herstellung von synthetischem Methan	23
Tabelle 6:	Materialrelevante Pkw-Eigenschaften 2020 und 2030 in Anlehnung an BIT et al. 2021 sowie eigenen Berechnungen.....	24
Tabelle 7:	Eigenschaften der Fahrzeugbatterien (2020 und 2030)	25

9 Literaturverzeichnis

- ADAC (2018): Elektro, Gas, Benzin, Diesel & Hybrid: Die Ökobilanz unserer Autos. Online verfügbar unter <https://www.adac.de/der-adac/motorwelt/reportagen-berichte/auto-innovation/studie-oekobilanz-pkw-antriebe-2018/>, zuletzt geprüft am 05.02.2019.
- ADAC (2020a): Autokatalog. Online verfügbar unter <https://www.adac.de/rund-ums-fahrzeug/autokatalog/>, zuletzt geprüft am 02.2021.
- ADAC (2020b): ADAC Autokostenrechner 2020. Online verfügbar unter <https://www.adac.de/info-testrat/autodatenbank/autokosten/>, zuletzt geprüft am 02.2021.
- ADAC (2021): ADAC Ecotest. Online verfügbar unter <https://www.adac.de/infotestrat/tests/ecotest/default.aspx?redirectId=quer.ecotest>, zuletzt geprüft am 02.2021.
- Agora – Prognos, Öko-Institut, Wuppertal-Institut (2020): Klimaneutrales Deutschland. Studie im Auftrag von Agora Energiewende, Agora Verkehrswende und Stiftung Klimaneutralität. Version 1.1, November 2020.
- Agora (2019a): Klimabilanz von Elektroautos. Einflussfaktoren und Verbesserungspotenzial. AGORA Verkehrswende, Berlin. Online verfügbar unter https://www.agora-verkehrswende.de/fileadmin/Projekte/2018/Klimabilanz_von_Elektroautos/Agora-Verkehrswende_22_Klimabilanz-von-Elektroautos_WEB.pdf, zuletzt geprüft am 07.05.2019.
- Agora (2019b): Klimabilanz von strombasierten Antrieben und Kraftstoffen. Durchgeführt von ifeu – Institut für Energie- und Umweltforschung, Berlin.
- Agora (2020): Klimaneutrales Deutschland. Studie im Auftrag von Agora Energiewende, Agora Verkehrswende und Stiftung Klimaneutralität. Durchgeführt von Prognos, Öko-Institut, Wuppertal-Institut.
- Agora (2021): Batteriestandort auf Klimakurs – Perspektiven einer klimaneutralen Batterieproduktion für Elektromobilität in Deutschland. Endbericht, Herausgeber Agora Verkehrswende. Studie durchgeführt vom Fraunhofer Institut für System- und Innovationsforschung ISI, Karlsruhe.
- Ausfelder, F.; Dura, H.E. (Hrsg.) (2018): Optionen für ein nachhaltiges Energiesystem mit Power-to-X-Technologien. Herausforderungen – Potenziale – Methoden – Auswirkungen. 1. Roadmap des Kopernikus-Projektes „Power-to-X“: Flexible Nutzung erneuerbarer Ressourcen (P2X). Frankfurt a.M.: DECHEMA Gesellschaft für Chemische Technik und Biotechnologie e.V.
- Barré et al. (2013): A review on lithium-ion battery ageing mechanisms and estimations for automotive applications. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2013.05.040>
- Bauer, W.; Riedel, O.; Herrmann, F.; Borrmann, D.; Sachs, C. (2018): ELAB 2.0: Wirkungen der Fahrzeugelektrifizierung auf die Beschäftigung am Standort Deutschland (Fraunhofer IAO)
- BAST (2017): Fahrleistungserhebung 2017.
- BIT, Fraunhofer ISI und dena (2021): Pkw-Antriebe für die Zukunft: Ökonomische, ökologische und technische Effizienz im Vergleich. Studie im Auftrag des BMWi. Deutsche Energie-Agentur GmbH (dena), BIT GmbH, Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI. dena: Berlin. Veröffentlichung in Vorbereitung

- BMVI (2019): Mobilität in Deutschland. MiD 2017. Hg. v. Bundesministerium für Verkehr und digitale Infra-struktur BMVI. infas Institut für angewandte Sozialwissenschaft GmbH; Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR); IVT Research; infas 360 GmbH. Berlin.
- BMW (2021): Langfristszenarien für die Transformation des Energiesystems in Deutschland. Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie (BMWi). Durchgeführt von Fraunhofer ISI, Consentec GmbH und ifeu. <https://www.langfristszenarien.de/enertile-explorer-de/>
- Bünger, Björn; Matthey, Astrid (2020): Methodenkonvention 3.1 zur Ermittlung von Umweltkosten. Kostensätze. Umweltbundesamt. Dessau-Roßlau
- Dai, Q.; Dunn, J.; Kelly, J. C.; Elgowainy, A. (2017): Update of Life Cycle Analysis of Lithium-ion Batteries in the GREET Model. Systems Assessment Group. Energy Systems Division. Argonne National Laboratory (ANL).
- Dai, Q.; Winjobi, O. (2019): Updates for Battery Recycling and Materials in GREET. Systems Assessment Center Energy Systems Division Argonne National Laboratory.
- Dallinger, D.; Schmid, J. (Hrsg.) (2012): Plug-in electric vehicles integrating fluctuating renewable electricity. Dissertation. Veröffentlicht in der Buchserie Erneuerbare Energien und Energieeffizienz, Band 20. Universität Kassel.
- de Gennaro et al. (2020). A case study to predict the capacity fade of the battery of electrified vehicles in real-world use conditions. Permalink: <https://doi.org/10.1016/j.cstp.2019.11.005>.
- DLR; IMU Institut; bridging IT (2019): Strukturstudie BWemobil 2019: Transformation durch Elektromobilität und Perspektiven der Digitalisierung (e-mobil BW GmbH)
- Doll, Claus; Krauss, Konstantin (2022): Nachhaltige Mobilität und innovative Geschäftsmodelle. Studien zum deutschen Innovationssystem. Nr. 10-2022. Berlin: EFL.
- Drünert, S.; Neuling, U.; Timmerberg, S.; Kaltschmitt, M. (2019): Power-to-X (PtX) aus „Überschussstrom“ in Deutschland – Ökonomische Analyse. In: Zeitschrift für Energiewirtschaft. Permalink: <https://doi.org/10.1007/s12398-019-00256-7>.
- EC (2020a): Determining the environmental impacts of conventional and alternatively fuelled vehicles through LCA. Endbericht für European Commission, DG Climate Action. Autoren: Nikolas Hill, Sofia Amaral, Samantha Morgan-Price, Tom Nokes, Judith Bates (Ricardo Energy & Environment), Hinrich Helms, Horst Fehrenbach, Kirsten Biemann, Nabil Abdalla, Julius Jöhrens (ifeu), Eloise Cotton, Lizzie German, Anisha Harris, Sebastien Haye, Chris Sim and Ausilio Bauen (E4tech).
- EC (2020b): A hydrogen strategy for a climate-neutral Europe. Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions. Brussels, 8.7.2020 COM(2020) 301 final
- Edel, M.; Jegal, J.; Siegemund, S. (2019): Bio-LNG – eine erneuerbare und emissionsarme Alternative im Straßengüter- und Schiffsverkehr. Potenziale, Wirtschaftlichkeit und Instrumente. Unter Mitarbeit von Patrick Schmidt und Werner Weindorf. Hg. v. Deutsche Energie-Agentur GmbH (dena).
- Ellingsen, L.A.; Majeau-Bettez, G.; Singh, B.; Srivastava, A.K.; Valøen, L.O.; Strømman, A.H. (2014): Life Cycle Assessment of a Lithium-Ion Battery Vehicle Pack. In: Journal of Industrial Ecology. Vol. 18, No.1, pp. 113–124.

- Emilsson, E.; Dahllöf, 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.
- European Climate Foundation (2018): Low-carbon cars in Europe: A socio-economic assessment (Cambridge Econometrics)
- Fattler, S. (2021): Economic and Environmental Assessment of Electric Vehicle Charging Strategies. Promotion an der Technischen Universität München. Veröffentlichung in Vorbereitung
- Frischknecht, R.; Messmer, A.; Stolz, P. (2018): Aktualisierte Umweltaspekte von Batterieelektrische Fahrzeugen – Eine Argumentarium. Eine Studie im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt. Durchgeführt von treeze, Uster.
- FfE -Forschungsstelle für Energiewirtschaft (2017): Basisdaten zur Bereitstellung elektrischer Energie. Online verfügbar unter <https://www.ffe.de/themen-und-methoden/erzeugung-und-markt/186-basisdaten-energietraeger>, zuletzt geprüft am 05.02.2019
- FVV (2021): CO₂-neutral mobil mit grünem Strom? So reagiert der Stromsektor auf die alternativen Antriebslösungen Eine Bewertung energetischer und regulatorischer CO₂-Effekte verschiedener Antriebstechnologien und Energieträger. Studie im Auftrag der Forschungsvereinigung Verbrennungskraftmaschinen e.V. (FVV) Research Association for Combustion Engines. Frontier Economics, ifw Kiel.
- Harto, C. (2020): Electric Vehicle Ownership Costs: Chapter 2 - Maintenance. Consumer Reports.
- Helmers, E.; Weiss, M. (2017): Advances and critical aspects in the Life-Cycle-Assessment of Battery Electric Vehicles. In Energy and Emission Control Technology 1. Feb. 2017.
- Helms, H.; Jöhrens, J.; Kämper, C.; Giegrich, J.; Liebich, A.; Vogt, R.; Lamprecht, U. (2016): Weiterentwicklung und vertiefte Analyse der Umweltbilanz von Batterieelektrische Fahrzeuge. Studie im Auftrag des Umweltbundesamts (UBA). Durchführung der Studie: ifeu. UBA: Dessau.
- Hill, N.; Windisch, E.; Kirsch, F.; Horton, G.; Dun, C.; Hausberger, S.; Matzer, C.; Skinner, I.; Donati, A.; Krause, J.; Thiel, C.; Wells, P. (2016): Improving understanding of technology and costs for CO₂ reductions from cars and LCVs in the period to 2030 and development of cost curves. Ref. CLIMA.C.2/FRA/2012/0006
- Hill, N.; Amaral, S.; Morgan-Price, S.; Nokes, T.; Bates, J.; Helms, H.; Fehrenbach, H.; Bie-mann, K.; Abdalla, N.; Jöhrens, J.; Cotton, E.; German, L.; Harris, A.; Ziem-Milojevic, S.; Haye, S.; Sim, C.; Bauen, A. (2020): Determining the environmental impacts of conventional and alternatively fuelled vehicles through LCA. Final Report for the European Commission, DG Climate Action Ricardo Energy & Environment, ifeu – Institut für Energie und Umweltforschung, E4tech, Didcot. Online verfügbar unter https://ec.europa.eu/clima/sites/clima/files/transport/vehicles/docs/2020_study_main_report_en.pdf, zuletzt geprüft am 16.10.2020.
- IASTEC (2021): Technical, regulatory and social challenges for realising CO₂-neutral drive technology for cars and commercial vehicles during the coming decades – Position Paper. IASTAC.
- IAV (2021): Hydrogen Powertrains in Competition to Fossil Fuel based Internal Combustion Engines and Battery Electric Powertrains. 42nd International Vienna Motor Symposium 2021. https://www.iav.com/app/uploads/2021/04/210422_Paper_Vienna_IAV.pdf

- ICCT (2018a): Effects of battery manufacturing on electric vehicle life-cycle greenhouse gas emissions. Briefing. The International Council on Clean Transportation (ICCT).
- ICCT (2018b): Power play: How governments are spurring the electric vehicle industry. White Paper. Unter Mitarbeit von Nic Lutsey, Mikhail Grant, Sandra Wappelhorst und Huan Zhou. The International Council on Clean Transportation (ICCT).
- ICCT (2019): From laboratory to road. A 2018 update of official and "real-world" fuel consumption and CO₂ values for passenger cars in Europe. Unter Mitarbeit von Uwe Tietge, Sonsoles Diaz, Peter Mock, Anup Bandivadekar, Jan Dornoff, Norbert Ligterink (TNO).
- IEA (2021): Global electrolysis capacity becoming operational annually, 2014-2023, historical and announced. Internet download Global electrolysis capacity becoming operational annually, 2014-2023, historical and announced – Charts – Data & Statistics – IEA
- ifeu (2020): Aktualisierung der Modelle TREMOD/TREMOD-MM für die Emissionsberichterstattung 2020 (Berichtsperiode 1990-2018). Michel Allekotte, Kirsten Biemann, Christoph Heidt, Marie Colson, Wolfram Knörr; ifeu – Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg. Im Auftrag des Umweltbundesamtes, UBA-Texte 116/2020.
- Institut für Arbeitsmarkt- und Berufsforschung (2018): Elektromobilität 2035: Effekte auf Wirtschaft und Erwerbstätigkeit durch die Elektrifizierung des Antriebsstrangs von Personenkraftwagen
- IPCC (2006): Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Volume 1. General Guidance and Reporting. Hg. v. Intergovernmental Panel on Climate Change.
- IPCC (2014): IPCC Working Group III – Mitigation of Climate Change, Annex II Metrics and Methodology – Table A.III.2 (Emissions of selected electricity supply technologies (gCO₂äq/kWh)). pp. 14–31.
- Jochem, P.; Babrowski, S.; Fichtner, W. (2015): Assessing CO₂ emissions of electric vehicles in Germany in 2030. In Transport Research Part A, 78 (2015), pp. 68-83.
- Kämper, C.; Helms, H.; Biemann, K. (2020): Wie klimafreundlich sind Elektroautos? Update Bilanz 2020.
- KBA (2020): Verkehr in Kilometern (VK). Zeitreihe 2014 bis 2020. Online verfügbar unter https://www.kba.de/SharedDocs/Downloads/DE/Statistik/Kraftverkehr/VK/vk_2020.xlsx?__blob=publicationFile&v=3; Kraftfahrtbundesamt; zuletzt geprüft am 14.01.2022
- Koch, T.; Böhlke, T. (2021): The averaging bias – a standard miscalculation, which extensively underestimates real CO₂ emissions. Journal of Applied Mathematics and Mechanics.
- Letmathe, P.; Soares, M. (2017): A consumer-oriented total cost of ownership model for different vehicle types in Germany. In: Transportation Research Part D: Transport and Environment 57, S. 314–335. DOI: 10.1016/j.trd.2017.09.007
- Manzetti, S.; Mariasiu, F. (2015): Electric vehicle battery technologies: From present state to future systems. In Renewable and Sustainable Energy Reviews, Volume 51, November 2015, Pages 1004-1012.
- Marmioli, B.; Maarten Messagie, M.; Dotelli, G.; Van Mierlo, J. (2018): Electricity Generation in LCA of Electric Vehicles: A Review. In Appl. Sci. 2018, 8, 1384; Permalink: doi:10.3390/app8081384.

- Michaelis, J. (2018): Modellgestützte Wirtschaftlichkeitsbewertung von Betriebskonzepten für Elektrolyseure in einem Energiesystem mit hohen Anteilen erneuerbarer Energien. Stuttgart: Fraunhofer Verlag (ISI-Schriftenreihe Innovationspotenziale).
- Moll, C.; Link, S. (2021): Attractiveness of Electric Vehicles under Current Tax and Incentive Schemes in Germany: A Total Cost of Ownership Calculation from the Customer's Perspective. eceee 2021 Summer Study on energy efficiency. Conference Proceedings. ISSN: 2001-7960
- Moro, A.; Lonza, L. (2018): Electricity carbon intensity in European Member States: Impacts on GHG emissions of electric vehicles. In Transportation Research Part D: Transport and Environment. Volume 64, October 2018, Pages 5-14.
- Nationaler Wasserstoffrat (2021): Wasserstoff Aktionsplan Deutschland 2021 – 2025. Berlin: Leitstelle Wasserstoff, dena. Online verfügbar unter: https://www.wasserstoffrat.de/fileadmin/wasserstoffrat/media/Dokumente/NWR_Aktionsplan_Wasserstoff_2021-2025_WEB-Bf.pdf, zuletzt geprüft am 26.08.2021.
- Notter et al. (2019): HBEFA 4.1 Development Report 2019. Notter, Benedikt; Keller, Mario; Althaus, Hans-Jörg; Cox, Brian; Knörr, Wolfram; Heidt, Christoph; Biemann, Kirsten; Räder, Dominik; Jamet, Marie. Im Auftrag des Bundesamt für Umwelt BAFU (CH), Umweltbundesamt UBA (DE), Umweltbundesamt UBA (AT), Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie ADEME (FR), Trafikverket (SE), Miljødirektoratet (NO). https://www.hbefa.net/e/documents/HBEFA41_Development_Report.pdf
- NPM (2020): Empfehlungen zum optimierten Nutzungsgrad von Plug-in-Hybriden. Bericht der PHEV-Taskforce. Nationale Plattform Zukunft der Mobilität, Berlin.
- Plötz, P.; Gnann, T.; Kühn, A.; Wietschel, M. (2014): Markthochlaufszszenarien für Elektrofahrzeuge. Langfassung. Studie im Auftrag der acatech - Deutsche Akademie der Technikwissenschaften und der Arbeitsgruppe 7 der Nationalen Plattform Elektromobilität (NPE). Fraunhofer Institut für System- und Innovationsforschung ISI. Karlsruhe.
- Plötz, P.; Moll, C.; Bieker, G.; Mock, P.; Li, Y. (2020): Real-world usage of plug-in hybrid electric vehicles: Fuel consumption, electric driving, and CO2 emissions. White Paper. Fraunhofer ISI; ICCT.
- Plötz, P. (2020): Reale Nutzung von Plug-in-Hybrid-Batterieelektrische Fahrzeugen. Policy Brief. Karlsruhe: Fraunhofer ISI.
- Preger et al. (2020): Degradation of Commercial Lithium-Ion Cells as a Function of Chemistry and Cycling Conditions. *J. Electrochem. Soc.* **167** 120532
- Prognos (2020): Kosten und Transformationspfade für strombasierte Energieträger. Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie. Prognos: Basel.
- Propfe, B.; Redelbach, M.; Santini, D.; Friedrich, H. (2012): Cost analysis of Plug-in Hybrid Electric Vehicles including Maintenance & Repair Costs and Resale Values. Institute of Vehicle Concepts, German Aerospace Center (DLR). Los Angeles.
- Prussi, M.; Yugo, M.; De Prada, L.; Padella, M.; Edwards (2020): JEC Well-To-Wheels report v5. EUR 30284 EN, Publications Office of the European Union, Luxembourg, ISBN 978-92-76-20109-0, doi:10.2760/100379, JRC121213.
- Rahimzei et al. (2015): Kompendium: Li-Ionen-Batterien im BMWi Förderprogramm IKT für Elektromobilität II: Smart Car – Smart Grid – Smart Traffic. Grundlagen, Bewertungskriterien, Gesetze und Normen.

- Robinius, M.; Linßen, J.; Grube, T.; Reuß, M.; Stenzel, P.; Konstantinos, S.; Kuckertz, P.; Stolten, D. (2018): Comparative Analysis of Infrastructures: Hydrogen Fueling and Electric Charging of Vehicles. Energie & Umwelt / Energy & Environment, Band / Volume 408. Forschungszentrum Jülich.
- Scherrer, A.; Burghard, U.; Wietschel, M.; Dütschke, E. (2019): Early Adopter von E-Fahrzeugen: Ladeleistungen, Eigenerzeugung und Einstellungen zum Lademanagement; in et. Energiewirtschaftliche Tagesfragen, Jahrgang 69, Heftnummer 11.
- Sievers, Luisa; Grimm, Anna (2022): Innovationstätigkeit des Automobilsektors - Analyse mit Fokus auf nachhaltigen Antriebstechnologien und Digitalisierung. Studien zum deutschen Innovationssystem. Nr. 8-2022. Berlin: EFI.
- Sens, Marc; Pannewitz, Marcel; Forell, Alexander; Brauer, Maximilian; Wukisiewitsch, Wolfgang; Kratzsch, Matthias (2020): Antriebskonzepte auf dem Weg zur CO2 neutralen Mobilität: Powertrain concepts on the path to CO2 neutral mobility. Band 1 von 41. Internationales Wiener Motorensymposium 22.-24. April 2020. ISSN 0933-0992
- SRU (2021): Wasserstoff im Klimaschutz – Klasse statt Masse. Sachverständigen Rat für Umweltfragen. Stellungnahme Juni 2021
- Stahl Consulting (2020): Der Weg hin zu einer CO2-armen Mobilität – Neue Perspektiven zur Verkehrs- und Energiewende in Deutschland. Hg. v. Stahl Automotive Consulting GmbH & Co. KG.
- Steinbuch, M. (2020): Tesla Model S battery degradation data. Online verfügbar unter <https://maartensteinbuch.com/2015/01/24/tesla-model-s-battery-degradation-data/>, zuletzt geprüft am 26.08.2021.
- Sternberg, A.; Hank, C.; Hebling, C. (2019): Treibhausgasemissionen für Batterie- und Brennstoffzellenfahrzeuge mit Reichweite über 300 km. Studie im Auftrag der H2 Mobility. Freiburg: Fraunhofer ISE.
- Thielmann, A.; Wietschel, M.; Funke, S.; Grimm, A.; Hettesheimer T.; Langkau, S.; Loibl, A.; Moll, C.; Neef, C.; Plötz P.; Sievers L.; Tercero Espinoza, L.; Edler, J. (2020): Batterien für Elektroautos: Faktencheck und Handlungsbedarf – Sind Batterien für Elektroautos der Schlüssel für eine nachhaltige Mobilität der Zukunft? Policy Brief. Karlsruhe: Fraunhofer ISI.
- UBA (2017): Berechnung von Treibhausgas (THG)-Emissionen verschiedener Energieträger. Online verfügbar unter <http://www5.umweltbundesamt.at/emas/co2mon/co2mon.html>, zuletzt geprüft am 13.02.2019.
- UBA (2018a): Wie umweltfreundlich sind Elektroautos? Eine ganzheitliche Bilanz. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMU). BMU: Berlin.
- UBA (2019a): Biogasproduktion aus Gülle und Bioabfall ausbauen. <https://www.umweltbundesamt.de/themen/biogasproduktion-aus-guelle-bioabfall-ausbauen>, zuletzt geprüft am 27.08.2019
- UBA (2019b): Marktanalyse Ökostrom II – Marktanalyse Ökostrom und HKN, Weiterentwicklung des Herkunftsnachweissystems und der Stromkennzeichnung. Abschlussbericht. Studie im Auftrag des Umweltbundesamtes. Durchgeführt von IZES gGmbH (Saarbrücken), Hamburg Institut (Hamburg) und imug (Hannover)
- UBA (2019c): Wie klimafreundlich ist LNG? Kurzstudie zur Bewertung der Vorkettenemissionen bei Nutzung von verflüssigtem Erdgas (LNG). Studie von Wachsmuth, J.; Oberle, S. (Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI, Karlsruhe) und Zubair, A; Köppel, W.; (

- DVGW-Forschungsstelle am Engler-Bunte-Institut des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT), Karlsruhe) im Auftrag des Umweltbundesamtes.
- UBA (2020): Systemvergleich speicherbarer Energieträger aus erneuerbaren Energien. Studie im Auftrag des Umweltbundesamtes. Durchgeführt von ifeu – Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt, Stuttgart, JOAN-NEUM RESEARCH Forschungsgesellschaft mbH, LIFE – Zentrum für Klima, Energie und Gesellschaft, Graz.
- UBA (2021a): Entwicklung der spezifischen Kohlendioxidemissionen des deutschen Strommix in den Jahren 1990 – 2020. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMU). BMU: Berlin.
- UBA (2021b): Gesellschaftliche Kosten von Umweltbelastungen. Online verfügbar unter <https://www.umweltbundesamt.de/daten/umwelt-wirtschaft/gesellschaftliche-kosten-von-umweltbelastungen#gesamtwirtschaftliche-bedeutung-der-umweltkosten>, zuletzt geprüft am 26.08.2021.
- VDI (2020): Ökobilanz von Pkw mit verschiedenen Antriebssystemen. Düsseldorf: Verein Deutscher Ingenieure (VDI).
- Wietschel, M.; Thielmann, A.; Plötz, P.; Gnann, T.; Sievers, L.; Breitschopf, B.; Doll, C.; Moll, C. (2017): Perspektiven des Wirtschaftsstandorts Deutschland in Zeiten zunehmender Elektromobilität (Fraunhofer ISI).
- Wietschel, M.; Kühnbach, M.; Stute, J.; Gnann, T.; Marwitz, S.; Klobasa, M. (2018): Auswirkung der Elektromobilität auf die Haushaltsstrompreise in Deutschland. Working Paper Sustainability and Innovation, No. S 21/2018. Karlsruhe: Fraunhofer ISI.
- Wietschel, M.; Kühnbach, M.; Rüdiger, R. (2019a): Die aktuelle Treibhausgasemissionsbilanz von batterieelektrischen Fahrzeugen in Deutschland. Working Paper Sustainability and Innovation, No. S 02/2019. Karlsruhe: Fraunhofer ISI.
- Wietschel, W.; Haendel, M.; Boßmann, T.; Deac, G.; Michaelis, J.; Doll, C.; Schlomann, B.; Köppel, W.; Degünther, C. (2019b): Integration erneuerbarer Energien durch Sektorkopplung: Analyse zu technischen Sektorkopplungsoptionen. Abschlussbericht Studie für das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit, durchgeführt vom Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung -ISI- (Karlsruhe) und der DVGW-Forschungsstelle am Engler-Bunte-Institut des Karlsruher Instituts für Technologie (Karlsruhe, KIT). Umweltbundesamt: Dessau-Roßlau.
- Wietschel, M.; Moll, C.; Oberle, St.; Lux, B.; Timmerberg, S.; Neuling, U.; Kaltschmitt, M.; Ashley-Belbin, N. (2019c): Klimabilanz, Kosten und Potenziale verschiedener Kraftstoffarten und Antriebssysteme für Pkw und Lkw. Endbericht. Studie gefördert vom Gefördert vom Biogasrat+ e.V.; Studiennehmer: Fraunhofer ISI, Technische Universität Hamburg (TUHH), Institut für Umwelttechnik und Energiewirtschaft (IUE); IREES GmbH – Institut für Ressourceneffizienz und Energiestrategien. Karlsruhe: Fraunhofer ISI.
- Wietschel, M. (2020a): Ein Update zur Klimabilanz von Batterieelektrische Fahrzeugen. Ein Update zur Klimabilanz von Batterieelektrische Fahrzeugen. Working Paper Sustainability and Innovation, No. S 01/2020. Karlsruhe: Fraunhofer ISI.
- Wietschel, M.; Bekk, A.; Breitschopf, B.; Boie, I.; Edler, J.; Eichhammer, W.; Klobasa, M.; Marscheider-Weidemann, F.; Plötz, P.; Sensfuß, F.; Thorpe, D.; Walz, R. (2020b): Chancen und Herausforderungen beim Import von grünem Wasserstoff und Syntheseprodukten. Policy Brief 03 /2020. Karlsruhe: Fraunhofer ISI.

- Wietschel, M.; Zheng, L.; Arens, M.; Hebling, C.; Ranzmeyer, O.; Schaadt, A.; Hank, C.; Sternberg, A.; Herkel, S.; Kost, C.; Ragwitz, M.; Herrmann, U.; Pfluger, B. (2021): Metastudie Wasserstoff – Auswertung von Energiesystemstudien. Studie im Auftrag des Nationalen Wasserstoffrats. Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung -ISI- (Karlsruhe), Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme – ISE- (Freiburg), Fraunhofer-Einrichtung für Energieinfrastrukturen und Geothermie –IEG Karlsruhe, Freiburg, Cottbus.
- Wulf, N. et al. (2020): Comparing Power-System and User-Oriented Battery Electric Vehicle Charging Representation and its Implications on Energy System Modelling. Department of Energy Systems Analysis, German Aerospace Center: Stuttgart
- Xu, L. et al. (2020): Greenhouse gas emissions of electric vehicles in Europe considering different charging strategies. In: Transport Research Part D: Transport and Environment Volume 87, October 2020
- Zapf, M.; Pengg, H.; Bütler, T.; Bach, C.; Weindl, C. (2020): Kosteneffiziente und Nachhaltige Automobile. Bewertung der Realen Klimabelastung und der Gesamtkosten - Heute und in Zukunft. Wiesbaden: Springer Vieweg. in Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH.