

FVV PRIME MOVERS. TECHNOLOGIES.

Cradle-to-Grave-Lebenszyklus- analyse im Mobilitätssektor

Metastudie zur CO₂-Bilanz alternativer Fahrzeugantriebe





›Well-to-Tank‹

Erzeugung,
Verarbeitung und
Bereitstellung der
Antriebsenergie.



›Cradle-to-Gate‹

Fertigungs-
prozesse
in der Fahrzeug-
herstellung.



›Tank-to-Wheel‹

Fahrzeug-
betrieb.



›Infrastruktur‹

Aufbau und Betrieb
der Energie-
infrastruktur.

›End-of-Life‹

Entsorgung oder
Recycling
der Fahrzeuge.



FVV PRIME MOVERS. TECHNOLOGIES.

Cradle-to-Grave-Lebenszyklus- analyse im Mobilitätssektor

Metastudie zur CO₂-Bilanz alternativer Fahrzeugantriebe

AUTOREN

Dr. David Bothe und Theresa Steinfert
Frontier Economics Ltd.
www.frontier-economics.com





PROF. DR.-ING.
PETER GUTZMER
Vorsitzender
FVV



DIPL.-ING.
DIETMAR GOERICKE
Geschäftsführer
FVV

Was ist umweltfreundlicher: Einen alten, aber funktionsfähigen Kühlschrank mit etwas höherem Stromverbrauch noch ein, zwei Jahre zu behalten oder ihn gegen einen neuen Kühlschrank der höchsten Effizienzklasse einzutauschen? Bereits eine scheinbar so banale Frage lässt sich eindeutig nur mit Hilfe einer Lebenszyklusanalyse beantworten, die alle Energie- und Stoffströme in der gesamten Wertschöpfungskette berücksichtigt, von der Gewinnung der Rohstoffe über die Produktion der Komponenten, die Montage, den Betriebszeitraum als auch das Ende des Produktlebens. Schon bei einem Kühlschrank ist das eine reichlich komplexe Angelegenheit. Geht es um einen Pkw mit mehreren Tausend Komponenten, betrieben mit Energieträgern, die auf großen Anlagen hergestellt und über aufwändige Infrastrukturen vertrieben werden, steigt die Komplexität einer Lebenszyklusanalyse erheblich. Schon kleine Veränderungen der Randbedingungen, etwa des für die Produktion der Fahrzeuge oder der Energieträger zugrunde gelegten Energiemix, können zu erheblichen Schwankungen der Ergebnisse führen.

Dennoch: Wenn wir klimaneutrale Antriebe und Energieträger für den Straßenverkehr erforschen, entwickeln und auf die Straße bringen wollen, ist es nicht sinnvoll, allein auf die Emissionen in der Betriebsphase zu schauen; es gilt, alle Aspekte des Lebenszyklus zu betrachten. Denn CO₂, das durch die Produktion von Fahrzeugen, Anlagen oder Infrastrukturen in die Atmosphäre gelangt, verbleibt dort länger als die Nutzungsphase andauert. Es belastet dadurch das globale CO₂-Budget, das uns noch zur Verfügung steht, um die Klimaziele von Paris zu erreichen. Dass die Lebenszyklusanalyse daher ein grundsätzlich sinnvolles Vorgehen darstellt, ist mittlerweile in weiten Kreisen von Politik und Wirtschaft Konsens. Das EU-Parlament hat die EU-Kommission sogar dazu aufgefordert, bis zur Mitte des Jahrzehnts Ideen für eine Regulierung des Pkw-Sektors auf Basis von Lebenszyklusanalysen vorzulegen. Wie also ist der Spagat zwischen vermuteter Ungenauigkeit einzelner Analysen und der generellen Sinnhaftigkeit der Lebenszyklusanalyse zu lösen?

Die FVV hat sich dafür entschieden, im ersten Schritt die vorliegende Metastudie zu existierenden Lebenszyklusanalysen in Auftrag zu geben. Dafür haben die Experten von Frontier Economics mehr als 80 Studien ausgewertet. Da nahezu alle Studien mit mehreren Szenarien arbeiten, sind insgesamt 430 Konstellationen eingeflossen, die unzähligen Arbeitsstunden wissenschaftlich ausgebildeter Experten entsprechen. Man könnte auch von „wissenschaftlicher Schwarmintelligenz“ sprechen.

Die Metaanalyse bestätigt zunächst die Vermutung, dass die Ergebnisse stark divergieren. Betrachtet man jedoch nur jene Bandbreite, die 50 % aller Studien um den Median abdeckt, ergeben sich relativ enge Streubänder. Sie ermöglichen es, unterschiedliche Antriebe und Energieträger zu vergleichen. Dabei zeigt sich: Während in Einzelbetrachtungen oft die eine Antriebstechnologie gegen die andere gewinnt, überlappen sich die Ergebnisse in der Metaanalyse so stark, dass bereits bei aktuellem Energiemix batterieelektrische Pkw und Dieselfahrzeuge in etwa auf Augenhöhe sind. Nimmt man nur jene Szenarien, in denen in der Betriebsphase ausschließlich regenerativ erzeugte Energieträger – E-Kraftstoffe, Grünstrom und grüner Wasserstoff eingesetzt werden – so schlägt das Pendel zugunsten des mit E-Kraftstoff betriebenen Verbrennungsmotors aus. Eine weitere wichtige Erkenntnis aus der Metastudie: Fast durchgehend werden die notwendigen Investitionen in die Energie-Infrastruktur nicht berücksichtigt. Ebenso finden die am Markt erfolgreichen Plug-in-Hybridantriebe nur selten Eingang in Lebenszyklusanalysen.

Es gibt also noch viel zu tun, damit die Lebenszyklusanalyse zu einem Standardwerkzeug in der Bewertung künftiger Antriebe und Energieträger werden kann. Voreilige Schnellschüsse, die sich auf die Ergebnisse einzelner Studien stützen, sind daher nicht ratsam.

Wir wünschen Ihnen eine spannende Lektüre und freuen uns, wenn Sie mit uns über die Ergebnisse diskutieren!

SEITE 8–15
Kurzüberblick

Klimaschutz im Mobilitätssektor erfordert
 einen umfassenden, nachhaltigen Ansatz 8

SEITE 16–27
Motivation und Herangehensweise

Bei globalen Herausforderungen müssen wir
 über nationale und branchenspezifische Ziele
 hinausblicken und das große Ganze betrach-
 ten 17

Unser Ziel bestand darin, eine umfassende
 Analyse des Lebenszyklus von Antriebs-
 technologien durchzuführen 18

Für eine nachhaltige Technologieauswahl
 braucht es eine umfassende branchen-
 übergreifende, globale und intertemporale
 Lebenszyklusanalyse 20

Der Datenbestand ist zwar groß, Schlüssel-
 informationen fehlen jedoch immer noch 24

Keine der betrachteten Studien deckt alle
 relevanten Aspekte im Detail ab 25

Vergleichbarkeit und Vollständigkeit bleiben
 eine zentrale Herausforderung 26

SEITE 28–41
Ergebnisse

Aus Sicht des Klimaschutzes liegt keine der Technologien klar an der Spitze	28
Emissionen treten bei den verschiedenen Antriebstechnologien in unterschiedlichen Lebenszyklusphasen auf	31
Die CO ₂ -Emissionen hängen stark vom Einzelfall und den spezifischen Rahmenbedingungen ab	41

SEITE 42–49
Schlussfolgerungen

Technologieoffene und zielorientierte Ansätze in der Klimapolitik sorgen für eine effektive Reduzierung der CO ₂ -Emissionen	42
Einmalige Fahrzeugemissionen in Kombination mit einer langen Lebensdauer erfordern eine besondere Berücksichtigung der zeitlichen Dimension	43
Branchenspezifische Ziele schaffen Anreize, Emissionen zu verlagern statt diese zu reduzieren	46
Klimapolitik erfordert stets einen klaren Blick auf das große Ganze	49

Literatur	50
Abbildungsverzeichnis	56
Disclaimer, Impressum	58

Die Studie im Kurzüberblick

»Klimaschutz im Mobilitätssektor erfordert einen umfassenden, nachhaltigen Ansatz.«

Mit dem Pariser Abkommen haben sich die Europäische Union und Deutschland **ehrgeizige Klimaschutzziele** gesetzt, die eine Reduzierung der jährlichen CO₂-Emissionen in allen energieverbrauchenden Sektoren vorsehen. Um dieses Budgetziel greif- und messbar zu machen, haben die Europäische Union und Deutschland das Budget **in Jahresziele eingeteilt**, d. h. das verbleibende CO₂-Budget wurde auf die kommenden Jahre verteilt, wobei in jedem Jahr ein bestimmtes Jahresbudget zur Verfügung steht. Das Jahresbudget der EU für 2050 ist dabei um 80-95 % kleiner als das für 1990.

Deutschland hat sich außerdem ein Zwischenziel für 2030 gesetzt. Bis dahin muss das Jahresbudget 55 % unter dem von 1990 liegen.

Treibhausgasemissionen in der Europäischen Union (Ausgangsbasis 1990 = 100)

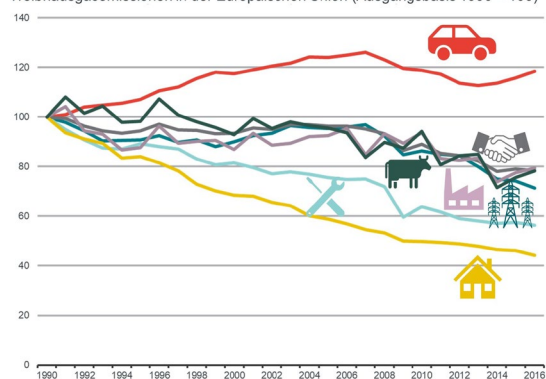


Abbildung 1: Stagnierende Emissionen im Verkehrssektor

Dieses Ziel wurde von der Bundesregierung in **branchenspezifische Ziele** für die Bereiche Energie, Gebäude, Verkehr, Industrie, Land- und Forstwirtschaft sowie Landnutzung **untergliedert**¹. So ist beispielsweise das Emissionsbudget im Verkehrssektor für 2030 um 40 % niedriger als 1990. Trotz der Bemühungen, antriebspezifische CO₂-Emissionen zu reduzieren (z. B. durch den Einsatz effizienterer Motoren), lässt sich in diesem Bereich nach wie vor keine Senkung der jährlichen Emissionen beobachten. Dies hängt damit zusammen, dass die spezifischen Emissionseinsparungen durch den steigenden Mobilitätsbedarf mehr als aufgewogen werden (siehe **Abbildung 1**).

Die stagnierenden Emissionen im Verkehrssektor haben eine intensive politische Diskussion über mögliche Konzepte und Technologien zur Erreichung des branchenspezifischen Ziels für 2030 ausgelöst. Hierbei werden jedoch die CO₂-Emissionen von Technologien in anderen Branchen, Ländern oder Jahren oft vernachlässigt. Angesichts der globalen Herausforderung des Klimawandels müssen die Emissionen jedoch umfassend über den gesamten Lebenszyklus betrachtet werden, um ihre tatsächlichen Klimaauswirkungen beurteilen zu können.

1 Die Zuordnung der Emissionen zu den einzelnen Sektoren erfolgt nach dem Quellenprinzip, d. h. die Emissionen werden dem „produzierenden“ Sektor zugeordnet und nicht demjenigen, in dem das Produkt verwendet wird.

»Bei globalen Herausforderungen müssen wir über nationale und branchenspezifische Ziele hinausblicken und das große Ganze betrachten.«

Die Unterteilung der globalen Zielsetzungen in spezifischere Ziele auf nationaler und sektoraler Ebene mag aus politischer Sicht ein sinnvoller Weg sein, da Meilensteine klar und messbar definiert werden. Allerdings wird so auch das Denken innerhalb geographischer oder sektoraler Grenzen gefördert, was die Bemühungen, Klimaschutzziele kosteneffizient oder im Extremfall überhaupt zu erreichen, gefährden kann.

Ausgehend von den vorstehenden Ausführungen hat sich hinsichtlich der Klimaschutzziele im Verkehrssektor eine intensive energiepolitische Debatte um Konzepte und Technologien entfacht – sowohl hinsichtlich der Antriebsart (Verbrennungsmotor oder

elektrischer Antrieb) als auch im Hinblick auf die Art der verwendeten Energiequellen (elektrisch, flüssig, gasförmig). In zahlreichen Studien wurde versucht, die Klimawirkung von Technologien über den gesamten Lebenszyklus zu analysieren. Aufgrund unterschiedlicher Schwerpunktsetzungen und Detailgrade bleibt es jedoch schwierig, daraus einen umfassenden Überblick abzuleiten.

Das Ziel der vorliegenden Studie besteht daher darin, verfügbare internationale Arbeiten und deren Ergebnisse zu untersuchen und dabei in einer Metaanalyse gleichzeitig „weiße Flecken“ zur Klimawirkung verschiedener Antriebstechnologien über den gesamten Lebenszyklus aufzuzeigen.

»Jährliche, nationale oder branchenspezifische Ansätze sind keine gute Basis, um die globale Herausforderung der Klimaerwärmung zu meistern.«

Die Klimaschutzpolitik ist eine direkte Folge der Erkenntnisse aus dem IPCC-Bericht. Hier kam man zu dem Schluss, dass nur noch ein Restbudget von **420 bis 580 Gt CO₂-Äq** verbleibt, um den weiteren globalen Temperaturanstieg auf 1,5 °C zu begrenzen (siehe **Abbildung 2**). Daher ist zu beachten, dass sämtliche technologischen Entscheidungen immer vor dem Hintergrund betrachtet werden müssen, wie wirksam sie für eine effiziente Verwendung dieses Restbudgets sind.

Dies erfordert eine Systemanalyse auf Grundlage einer branchenübergreifenden, globalen und zeitlich unbegrenzten Ebene:

- **In allen Branchen gilt es, Emissionen zu verringern.** Um einen umfassenden Vergleich der verschiedenen Technologien sicherzustellen, sollten alle Emissionen, die ein Fahrzeug in anderen Sektoren verursacht, dem betreffenden Fahrzeug zugerechnet werden.
- **Die Auswirkungen auf das Klima sind global.** Für den Treibhauseffekt ist es unerheb-

lich, an welchem geographischen Ort die Emissionen verursacht werden.

- **Die Klimawirkung von CO₂ ist nicht zeitabhängig.** Um die globale Erwärmung auf maximal 1,5 oder 2 °C zu begrenzen, darf weltweit nur noch eine bestimmte Menge an Treibhausgasen freigesetzt werden (d. h. ein globales CO₂-Restbudget). Dies bedeutet, dass alle Emissionen relevant sind – unabhängig davon, wann sie ausgestoßen werden.

Viele Maßnahmen zum Klimaschutz haben jedoch eine zeitliche, geographische und/oder sektorale Begrenzung (siehe **Abbildung 3**): So gelten EU-Flottenziele beispielsweise nur innerhalb der Europäischen Union. National festgelegte Maßnahmen haben in der Regel einen noch engeren Anwendungsbereich. Darüber hinaus konzentrieren sich die EU-Flottenziele nur auf ein ganz bestimmtes Stadium im Lebenszyklus, d. h. die Fahrzeugnutzung. Die Fahrzeugemissionen im Energie- und Industriesektor werden in diesem Zusammenhang nicht berücksichtigt.

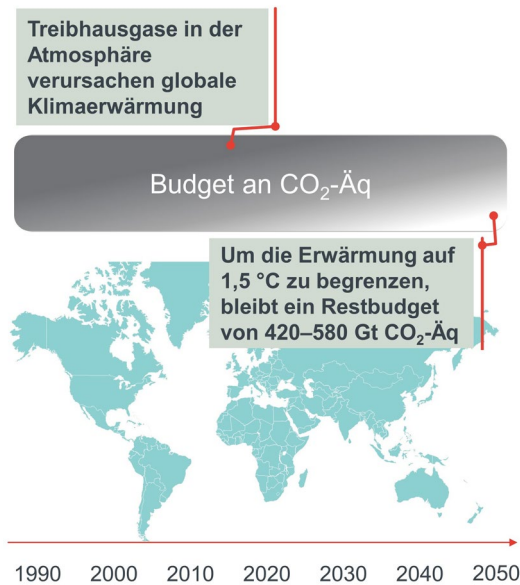


Abbildung 2: Das globale Budget für CO₂-Äq ist begrenzt

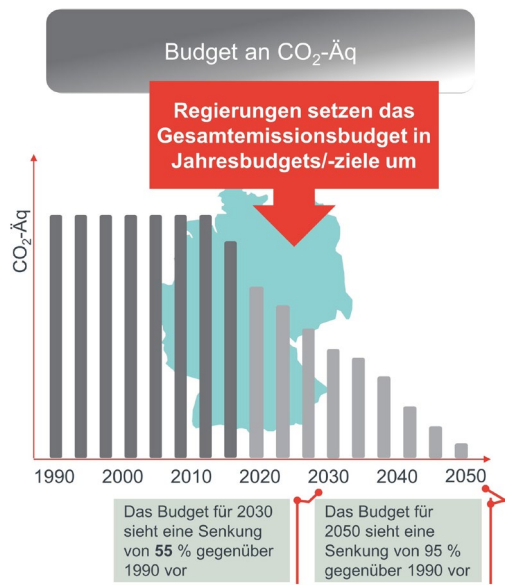


Abbildung 3: Regierungen setzen das Budget in nationale Jahresziele um

»Für eine nachhaltige Technologieauswahl braucht es eine umfassende branchenübergreifende, globale und intertemporale Lebenszyklusanalyse.«

Um Technologien im Hinblick auf Klima- und Nachhaltigkeitsaspekte sinnvoll bewerten zu können, müssen alle direkten und indirekten Auswirkungen auf allen vor- und nachgelagerten Stufen der Wertschöpfungskette berücksichtigt werden: Die Perspektive muss erweitert werden, um eine umfassende Lebenszyklusanalyse für alle Lebensphasen eines Produkts zu gewährleisten.

Bei einer Beschränkung auf einen bestimmten Abschnitt des Lebenszyklus (wie z. B. die Nutzungsphase eines Fahrzeugs) kann es dazu kommen, dass auch solche Technologien möglicherweise gut abschneiden, die in einer Gesamtbetrachtung keine Emissionseinsparungen bewirken. Dies hängt damit zusammen, dass die Emissionen innerhalb der engen sektorspezifischen, geografischen und zeitlichen Perspektive geringer ausfallen.

Vor diesem Hintergrund führt kein Weg an einer umfassenden Analyse vorbei, die alle Emissionen über den gesamten Lebenszyklus einer Technologie erfasst (siehe **Abbildung 4**).

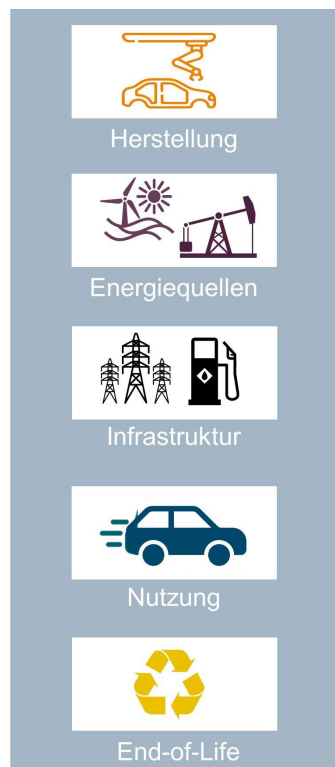


Abbildung 4: Phasen des Lebenszyklus

Neben

- der reinen Nutzung des Fahrzeugs (Tank-to-Wheel)

gehören hierzu insbesondere:

- die Herstellung des Fahrzeugs (Cradle-to-Gate)
- die Bereitstellung der Antriebsenergie (Well-to-Tank)
- der Aufbau und Betrieb der notwendigen Infrastruktur (Infrastruktur)
- das Recycling des Fahrzeugs zur Rückgewinnung von Rohstoffen (End-of-Life)

»Der Datenbestand ist zwar groß, Schlüsselinformationen fehlen jedoch noch.«

Für diese Metaanalyse haben wir mehr als 80 Studien gesichtet und überprüft, die sich mit den CO₂-Emissionen von Fahrzeugen und Antrieben über den gesamten oder Teile des Lebenszyklus beschäftigen.

Trotz des großen Datenbestands lässt sich festhalten, dass einige **wichtige Informationen noch immer fehlen**: Während Lebenszyklusphasen wie die Fahrzeugherstellung und -nutzung in den meisten Studien abgedeckt werden, werden die Emissionen am Ende des Lebenszyklus sehr viel seltener thematisiert. Zudem geht fast keine der untersuchten Studien auf den notwendigen Ausbau der Infrastruktur und die damit verbundenen Emissionen ein. Antriebstechnologien von batteriebetriebenen Elektrofahrzeugen (BEVs) und Diesel- oder Benzinfahrzeugen mit Verbrennungsmotoren (ICEVs) werden zudem in den meisten Studien behandelt, andere Technologien (wie Fahrzeuge, die mit Erdgas, Wasserstoff oder E-Kraftstoffen aus erneuerbaren Energien betrieben werden, z. B. Brennstoffzellelektrofahrzeuge (FCEVs) oder ICEVs) werden jedoch nur in Ausnahmefällen beschrieben.

Die einzelnen Lebenszyklusabschnitte lassen sich nahezu beliebig festlegen. Das bedeutet einerseits, dass verlässliche Aussagen zu den Vorteilen einzelner Antriebsoptionen hinsichtlich der Klimaschutzziele ohne Berücksichtigung der oben dargestellten komplexen Wechselwirkungen nicht möglich sind. Umgekehrt stoßen Forscher an pragmatische Grenzen und versuchen möglicherweise, die umfangreichen Effekte zumindest auf aggregierter Ebene zu betrachten.

Auch die **Vergleichbarkeit bleibt nach wie vor eine große Herausforderung**: Im individuellen Straßenverkehr gibt es unzählige Anwendungsfälle – und jeder zugrunde liegende Parameter wirkt sich auf die Gesamtemissionswirkung eines Fahrzeugs aus. Zu den Parametern gehören die Laufleistung, die Nutzungshäufigkeit, die Fahrzeuggröße sowie die Beladung. Der klimatische Fußabdruck eines Nutzfahrzeugs mit einer jährlichen Fahrleistung von mehr als 50.000 km ist folglich nicht vergleichbar mit dem Fußabdruck eines Pendlerfahrzeugs, mit dem täglich nur eine begrenzte Strecke zurückgelegt wird. Anwendungsfälle und ihre jeweiligen Emissionen werden auch durch Faktoren wie Klimaregion und Topologie beeinflusst.



Angesichts der enormen Anzahl an unterschiedlichen Anwendungsfällen können die Ergebnisse einzelner Studien daher nur in begrenztem Maß verallgemeinert werden.

Bei einem Vergleich verschiedener Technologien in den Studien ist zu beachten, dass das Ergebnis immer auf dem konkreten Anwendungsfall und den jeweils zugrunde liegenden Parametern basiert. Die meisten Studien beziehen sich auf einen generischen Anwendungsfall. In einer relativ kleinen

Anzahl an Studien werden auch andere, gängige Anwendungsfälle mit anderen Fahrzeuggrößen oder Fahrverhalten betrachtet. Daher können Erkenntnisse aus den einzelnen Studien nur bedingt verallgemeinert werden.

»Aus Sicht des Klimaschutzes liegt keine der Technologien klar an der Spitze. Die CO₂-Emissionen treten vielmehr in unterschiedlichen Phasen des Lebenszyklus auf.«

In den vorliegenden Studien zeigt sich hinsichtlich der Gesamt-CO₂-Emissionen ein sehr heterogenes Bild, bedingt durch die verschiedenen alternativen Antriebsmöglichkeiten im Verkehrssektor.

Abbildung 5 zeigt eine zusammenfassende Darstellung der Ergebnisse für die am häufigsten untersuchten Technologien in verschiedenen Lebenszyklusphasen: BEVs, die ihren Ladestrom aus dem vor Ort verfügbaren Stromnetz beziehen; BEVs, die ihren Strom zu 100 % aus erneuerbaren Quellen beziehen; ICEVs, die mit Diesel und Benzin oder mit einem erneuerbaren E-Kraftstoff aus Strom betrieben werden; und FCEVs, die mit Wasserstoff (H₂) betrieben werden, der aus einem Mix von Quellen wie Erdgas sowie regenerativem Strom mittels Elektrolyse stammt.

Insgesamt liegt keine **Technologie klar an der Spitze**. Lebenszyklusanalysen belegen, dass die CO₂-Emissionen bei vielen verfügbaren Antriebstechnologien ähnlich sind. Die sehr große Schwankungsbreite der Ergebnisse ist jedoch sowohl durch die **Unsicherheiten** als auch durch die unterschiedlichen Anwendungsfälle bedingt.

Die Emissionen fallen in den **verschiedenen Lebenszyklusabschnitten** der jeweiligen Technologien sehr unterschiedlich aus. Die Fahrzeugherstellung und die Well-to-Wheel-Emissionen (d. h. die Gewinnung der Antriebsenergie und die Fahrzeugnutzung) machen den größten Anteil der Emissionen aus. Die Fahrzeugherstellung schlägt bei BEVs und FCEVs in allen Studien stärker zu Buche als bei Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor. Allerdings

bieten BEVs tendenziell Vorteile bei den Well-to-Wheel-Emissionen.

Folglich ergibt sich die geeignetste Technologie aus **individuellen Annahmen** und spezifischen Rahmenbedingungen. Ein klarer Trend zeichnet sich hierbei nicht ab.

Es gibt aber Hinweise darauf, wie in Zukunft **alle Technologien** ihre Emissionsbelastung deutlich reduzieren und sogar klimaneutral werden können. Dies ist möglich, wenn „grüne“ Antriebsenergie eingesetzt wird, d. h. Ladestrom, H₂ und E-Kraftstoffe stammen aus erneuerbaren Quellen.



Die Forschungslücken umfassen sowohl Lebenszyklusphasen als auch Technologieoptionen.

Im Rahmen unserer Metaanalyse wurden jedoch auch einige verbleibende **Forschungslücken** bzw. weiße Flecken aufgedeckt:

- Nur wenige Studien gehen im Detail auf die Emissionen am **Ende der Lebensdauer** ein. Eine genauere Schätzung der CO₂-Bilanz wäre jedoch vor allem insofern interessant, als die Wirkungsrichtung am Ende des Lebenszyklus in beide Richtungen gehen kann – nämlich sowohl in Richtung Emissionen als auch in Richtung Emissionseinsparungen.



Abbildung 5: Basierend auf der CO₂-Lebenszyklusanalyse geht keine der Technologien als klarer Sieger hervor

Anmerkung: Um eine grobe Vergleichbarkeit zu gewährleisten, wurden die Studienergebnisse auf eine maximale Laufleistung von 150.000 km skaliert.

- In keiner der Studien werden die Emissionen der **Energieinfrastruktur** in der Lebenszyklusanalyse eines Fahrzeugs berücksichtigt. Nach Analyse einiger spezifischer Studien kamen wir jedoch zu dem Schluss, dass die Infrastrukturemissionen durchaus einen Anteil von fast 10 %² der gesamten Fahrzeugemissionen ausmachen können. Dementsprechend dürfen diese Emissionen nicht vernachlässigt werden und erfordern eine weitere Analyse.
- Die Abdeckung aller verfügbaren **technologischen Optionen in den untersuchten Studien** ist relativ unausgewogen: Es werden im Allgemeinen nicht alle Arten von E-Kraftstoffen behandelt und auch FCEVs und kombinierte Antriebe wie Hybride werden nur selten untersucht.

»Technologieoffene und zielorientierte Ansätze in der Klimapolitik können für eine effektive Reduzierung der CO₂-Emissionen sorgen.«

Bisher haben wir Folgendes diskutiert:

- Klimapolitische Entscheidungen zu einzelnen Technologien müssen zunächst auf einer **umfassenden Analyse** basieren, um nachhaltige Technologien sicherzustellen (siehe **Kapitel 2** Motivation und Herangehensweise, Abschnitt „Für eine nachhaltige Technologieauswahl braucht es eine umfassende branchenübergreifende, globale und intertemporale Lebenszyklusanalyse“).
- Ein umfassender **Datenbestand** liegt bislang leider **noch nicht** vor (siehe **Kapitel 2** Motivation und Ansatz, Abschnitt „Der Datenbestand ist zwar groß, Schlüsselinformationen fehlen jedoch immer noch“).
- Basierend auf den vorliegenden Erkenntnissen deutet sich an, dass es **keine eindeutig überlegene Technologie** gibt. Vielmehr hängen die relativen Vorteile der Antriebstechnologien von sehr individuellen Umständen ab (siehe **Kapitel 3** Ergebnisse).

Dennoch muss sich die **Klimapolitik** jetzt der Herausforderung der globalen Erwärmung stellen. Die kombinierten Ergebnisse der überprüften Studien lassen – trotz der genannten Einschränkungen – einige erste Schlussfolgerungen zu politischen

Empfehlungen zu:

- **Aufgrund unvollständiger Informationen ist ein zielgerichteter und technologieneutraler Ansatz in der Politik erforderlich:** Viele Parameter hängen von individuellen Anwendungsfällen ab und sind daher von Natur aus nicht geeignet für eine zentrale Entscheidungsfindung. Darüber hinaus ist davon auszugehen, dass sich viele Technologien, das Mobilitätsverhalten und weitere Rahmenbedingungen in Zukunft ändern und viele Entwicklungen unvorhersehbar bleiben werden. Entsprechend birgt jede technologiebezogene Entscheidung heute ein erhebliches Risiko, sich in Zukunft als falsch zu erweisen. Die wichtigste Empfehlung an die Politik lautet daher, eine technologieoffene Gestaltung zu verfolgen.
- **Einmalige Fahrzeugemissionen in Verbindung mit einer langen Lebensdauer erfordern eine besondere Berücksichtigung der zeitlichen Dimensionen:** Politische Anstrengungen zur Erreichung spezifischer Ziele (wie das 2030-Ziel für den deutschen Verkehrssektor) können – bei begrenzter zeitlicher Perspektive – dazu führen, dass das Restbudget für Emissionen in die Atmosphäre insgesamt

² Konservativ gehen wir von einem Anteil zwischen 5 und 8 % aus.

überschritten wird (siehe **Abbildung 6**). Dies kann insbesondere dann der Fall sein, wenn für eine Reduzierung der jährlichen Verkehrsemissionen (z. B. Tank-to-Wheel) hohe einmalige Emissionen in den Vorjahren (z. B. Emissionen beim Fahrzeugbau) erforderlich werden. Das Beispiel in **Kapitel 4** Schlussfolgerungen verdeutlicht die Relevanz der zeitlichen Dimension und der Einhaltung des Emissionsbudgets für die Erreichung der Klimaziele.

- **Bei sektoralen Zielen besteht das Risiko, dass diese eher zu einer Verschiebung von Emissionen führen als zu einer tatsächlichen Reduzierung.** Die Beispielberechnung zeigt, wie sich eine politische Maßnahme – ideal für die Verringerung der jährlichen Emissionen im Verkehrssektor – negativ auf den Industrie- und Stromsektor auswirken kann. Daran wird die Wichtigkeit einer branchenübergreifenden Perspektive sowie der zeitlichen Dimension deutlich.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass ein **technologieoffener Ansatz verfolgt werden muss, der stets das Gesamtbild im Blick behält.**

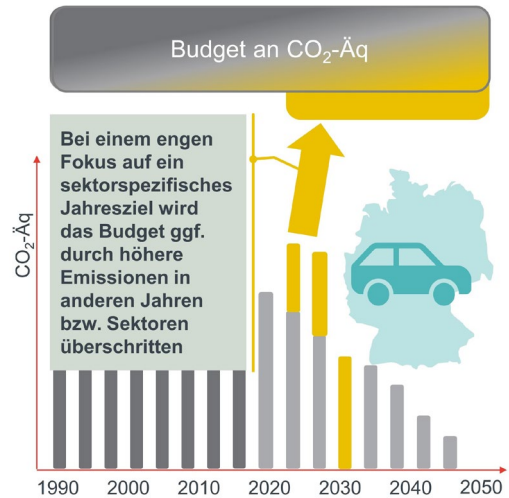


Abbildung 6: Die zeitliche Dimension ist bei großen einmaligen Emissionen ein entscheidender Faktor

Motivation

Auf der Grundlage des Pariser Klimaschutzabkommens haben sich Deutschland und die Europäische Union das ehrgeizige Ziel gesetzt, die Treibhausgasemissionen (CO₂-Äq, CO₂) bis 2050 um 80-95 % gegenüber 1990 zu reduzieren. Dementsprechend sieht der Klimaschutzplan 2050 der Bundesregierung ein Zwischenziel für 2030 vor. Bis dahin sollen die CO₂-Emissionen mindestens 55 % unter dem Niveau von 1990 liegen. Dieses Ziel wurde in Einzelziele für die Sektoren Energie, Gebäude, Verkehr, Industrie, Land- und Forstwirtschaft sowie Landnutzung aufgeschlüsselt³.

Im Verkehrssektor – und insbesondere im Straßenverkehr – werden die öffentlichen Debatten zunehmend lauter. Darüber hinaus werden zahlreiche

erzielte Effizienzsteigerungen durch den kontinuierlich wachsenden Mobilitätsbedarf nahezu aufgewogen (siehe **Abbildung 7**). Die Mobilität hat zum Wirtschaftswachstum in vielen Sektoren beigetragen bzw. wurde von diesem Wachstum beflügelt. Das spiegelt sich auch in der aktuell zunehmenden Nutzung von Mobilitätslösungen in absoluten Zahlen wider. Dies erklärt auch, warum die CO₂-Emissionen des Verkehrssektors im Vergleich zu den Werten von 1990 in absoluten Zahlen nicht zurückgegangen sind (siehe **Abbildung 7** linke Grafik). Angesichts dieses historischen Trends erscheint das von der Bundesregierung gesetzte Ziel, die Emissionen des Verkehrssektors bis 2030 um 40 % zu reduzieren, besonders ehrgeizig.

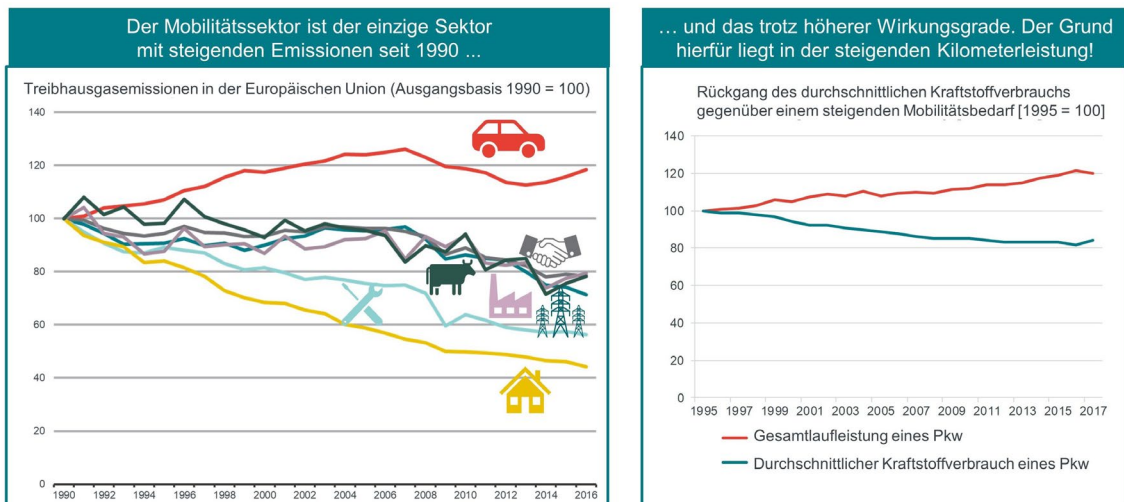


Abbildung 7: Die Emissionen im Mobilitätssektor haben trotz höherer Wirkungsgrade zugenommen

3 Die Zuordnung der Emissionen zu den einzelnen Sektoren erfolgt nach dem Quellenprinzip, d. h. die Emissionen werden dem „produzierenden“ Sektor zugeordnet und nicht demjenigen, in dem das Produkt verwendet wird.

»Bei globalen Herausforderungen müssen wir über nationale und branchenspezifische Ziele hinausblicken und das große Ganze betrachten.«

Die Unterteilung der globalen Zielsetzungen in spezifischere Ziele auf nationaler und sektoraler Ebene mag aus politischer Sicht ein sinnvoller Weg sein, da Meilensteine klar und messbar definiert werden.

Allerdings wird so auch das Denken innerhalb geographischer oder sektoraler Grenzen gefördert, was die Bemühungen, Klimaschutzziele kosteneffizient oder im Extremfall überhaupt zu erreichen, gefährden kann. Es ist auch denkbar, dass Maßnahmen zur CO₂-Reduzierung in einem Sektor zwar eine maximale Reduzierung der CO₂-Emissionen in diesem spezifischen Sektor garantieren, dieselben Maßnahmen in anderen Bereichen jedoch dazu führen, dass die Emissionswerte gleich bleiben oder gar ansteigen. Insgesamt bleiben die CO₂-Emissionen dadurch über alle Sektoren hinweg mehr oder weniger konstant. Insbesondere im Hinblick auf die zunehmende Sektorkopplung ist es fraglich, ob die Gesamtziele kosteneffizient erreicht werden können, wenn jeder Sektor nur seine eigenen Ziele verfolgt.

Sowohl im Hinblick auf die Erreichung der übergeordneten Ziele des Pariser Abkommens als auch unter dem Gesichtspunkt der Nachhaltigkeit⁴ muss stets bedacht werden, dass CO₂-Emissionen und Strategien zur deren Reduzierung globale Auswirkungen haben. Dementsprechend kann eine einseitige geographische

Verlagerung von Emissionen in andere Regionen (z. B. durch Verlagerung in vor- oder nachgelagerte Stufen) zwar dazu führen, dass politische Ziele auf nationaler Ebene eingehalten werden, das bedeutet allerdings nicht, dass diese Verlagerung auch auf globaler Ebene zur Zielerreichung in den Bereichen Klimaschutz bzw. Nachhaltigkeit (z. B. Schutz der Menschenrechte oder Wassereinsparungen) beiträgt.

Aufgrund dieser zentralen Fragestellungen hat sich im Verkehrssektor eine intensive energiepolitische Debatte um Konzepte und Technologien entfacht – sowohl hinsichtlich der Antriebsart (Verbrennungsmotor oder elektrischer Antrieb) als auch im Hinblick auf die Art der verwendeten Energiequellen (elektrisch, flüssig, gasförmig). Angesichts der unterschiedlichen Mobilitätstechnologien hat dies dazu geführt, dass neben den deutlich sichtbaren Effekten in der eigentlichen Nutzungsphase der Fahrzeuge über den gesamten Lebenszyklus hinweg die Emissionen und andere nachhaltigkeitsrelevante Effekte zunehmend in den Fokus gerückt sind.

In diesem Zusammenhang hat die FVV Frontier Economics beauftragt, eine Metaanalyse und Bewertung von internationalen Studien zur Klimabilanz verschiedener Antriebstechnologien über den gesamten Lebenszyklus eines Fahrzeugs (Cradle-to-Grave oder Cradle-to-Cradle, siehe **Kapitel 2**) durchzuführen.

⁴ Im Jahr 2015 haben die Vereinten Nationen die Agenda 2030 mit 17 globalen Zielen für nachhaltige Entwicklung und eine bessere Zukunft herausgegeben. Klimaschutz ist eines der 17 Ziele.

»Unser Ziel bestand darin, eine umfassende Analyse des Lebenszyklus von Antriebstechnologien durchzuführen.«

Dazu haben wir mehr als 80 Studien mit fast 500 Szenarien⁵ (die meisten aus den letzten 15 Jahren und mit deutschem oder europäischem Fokus) ausgewertet, in denen die CO₂-Emissionen von Antriebstechnologien über alle oder ausgewählte Lebenszyklusphasen (d. h. Fahrzeugherstellung, Kraftstoffherstellung, Energieinfrastruktur, Nutzung und Lebensende) analysiert werden. In Fällen, in denen keine Daten vorliegen, werden zusätzlich auch Analysen verschiedener Komponenten (z. B. zu Batterien oder einzelnen Infrastrukturkomponenten) berücksichtigt. Zu den Zielen gehören:

- Erstens gilt es herauszufinden, was als sicheres Wissen angesehen werden kann und in welchen Bereichen es noch Unsicherheiten oder gar „weiße Flecken“ gibt.
- Zweitens werden wir auf der Grundlage der vorliegenden Studienergebnisse Schlussfolgerungen zu den Vorteilen einzelner Antriebstechnologien ziehen.

Dabei berücksichtigen wir die Tatsache, dass die Emissionen über alle Sektoren und Regionen hinweg und intertemporal betrachtet werden müssen.

Der Aufbau der Studie gestaltet sich wie folgt:

- Zunächst wird in Kapitel 2 Motivation und Herangehensweise, Abschnitt „Für eine nachhaltige Technologieauswahl braucht es eine umfassende branchenübergreifende, globale und intertemporale Lebenszyklusanalyse“, erläutert, welche Aspekte bei der umfassenden Analyse der CO₂-Emissionen verschiedener Antriebstechnologien über den gesamten Lebenszyklus hinweg berücksichtigt werden müssen.
- Kapitel 2 Motivation und Herangehensweise, Abschnitt „Der Datenbestand ist zwar groß, Schlüsselinformationen fehlen jedoch immer noch“, gibt einen Überblick über die verfügbare Literatur und geht auf die Herausforderungen im Hinblick auf die Vergleichbarkeit und Vollständigkeit verschiedener Studien ein.
- In Kapitel 3 Ergebnisse werden die Resultate unserer Metaanalyse für jeden Abschnitt des Lebenszyklus eines Fahrzeugs ausführlicher dargestellt.
- In Kapitel 4 Schlussfolgerungen werden schließlich Empfehlungen an die Politik formuliert.

⁵ Ein Szenario umfasst eine Technologie (z. B. BEV, ICEV mit Dieselmotor) und Annahmen zum Strommix, zur Herstellungsmethode für Wasserstoff sowie zur Fahrzeuggröße.

Für eine nachhaltige Technologieauswahl braucht es eine umfassende branchenübergreifende, globale und intertemporale Lebenszyklusanalyse

Um Technologien im Hinblick auf Klima- und Nachhaltigkeitsaspekte sinnvoll bewerten zu können, müssen alle direkten und indirekten Auswirkungen auf allen vor- und nachgelagerten Stufen der Wertschöpfungskette berücksichtigt werden. Die Perspektive muss erweitert werden, um eine umfassende Lebenszyklusanalyse für alle Lebensphasen eines Produkts zu gewährleisten. Im Hinblick auf das höhere Ziel einer Kreislaufwirtschaft spielt auch das Recycling und die Wiedereinführung in den Rohstoffkreislauf eine wichtige Rolle.

Klimapolitische Maßnahmen müssen branchenübergreifend, global und ohne zeitliche Begrenzung gedacht werden.

»Nationale, branchenspezifische Überlegungen geben nur wenig Aufschluss über die Auswirkungen einer Technologie.«

Dies erfordert eine Systemanalyse auf Grundlage einer branchenübergreifenden, globalen und zeitlich unbegrenzten Ebene (siehe **Abbildung 8**):

- **In allen Branchen gilt es, Emissionen zu verringern.** Um einen umfassenden Vergleich der Technologien zu gewährleisten, sollten alle Emissionen, die ein Fahrzeug in anderen Sektoren verursacht (z. B. im Energiesektor bei der Erzeugung der Antriebsenergie oder im Industriesektor bei der Fahrzeugherstellung), dem Fahrzeug zugerechnet werden. Eine ausschließliche Konzentration auf den Verkehrssektor ist im Hinblick auf die Gesamtemissionsziele nur wenig aussagekräftig – insbesondere im Zusammenhang mit einer Sektorkopplung.
- **Die Auswirkungen auf das Klima sind global.** Für den Treibhauseffekt ist es unerheblich, wo die Emissionen verursacht werden. Folglich sollten nicht nur die Emissionen bei der Fahrzeugherstellung in Deutschland oder in der EU, sondern vielmehr auch die in Zulieferländern wie China verursachten Emissionen berücksichtigt werden. Nationale Ziele – zum Beispiel die Ziele aus dem Kyoto-Protokoll oder dem Pariser Abkommen – sind daher ebenfalls kritisch zu betrachten, da Emissionen importiert oder exportiert werden können. Wenn die Ziele zur Verringerung der Treibhausgasemissionen unterschiedlich hoch gesteckt werden, ergibt sich daraus ein Anreiz, Prozesse mit hohen Emissionen in Länder mit weniger strenger Vorschriften zu verlagern, anstatt diese zu senken.

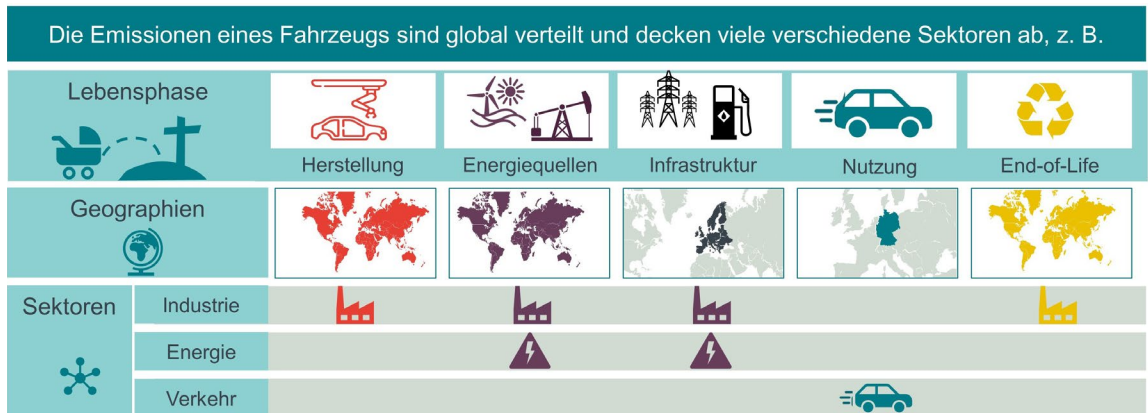


Abbildung 8: Nationale, branchenspezifische Überlegungen geben nur wenig Aufschluss über die Auswirkungen einer Technologie

- Die Klimawirkung von CO₂ ist nicht zeitabhängig.** Im Hinblick auf Emissionseinsparungen werden die relevanten Emissionsmengen durch den Bestand an absoluten und kumulierten CO₂-Emissionen ausgedrückt: Um die globale Erwärmung auf maximal 1,5 oder 2 °C zu begrenzen, darf weltweit nur noch eine bestimmte Menge an Treibhausgasen freigesetzt werden (d. h. ein globales CO₂-Restbudget). Dies bedeutet, dass alle Emissionen relevant sind – unabhängig davon, wann sie ausgestoßen werden. Die positive Korrelation zwischen den kumulierten, vom Menschen verursachten CO₂-Emissionen seit 1876 und der Temperaturänderung von 1850–1900 ist in **Abbildung 9** dargestellt.

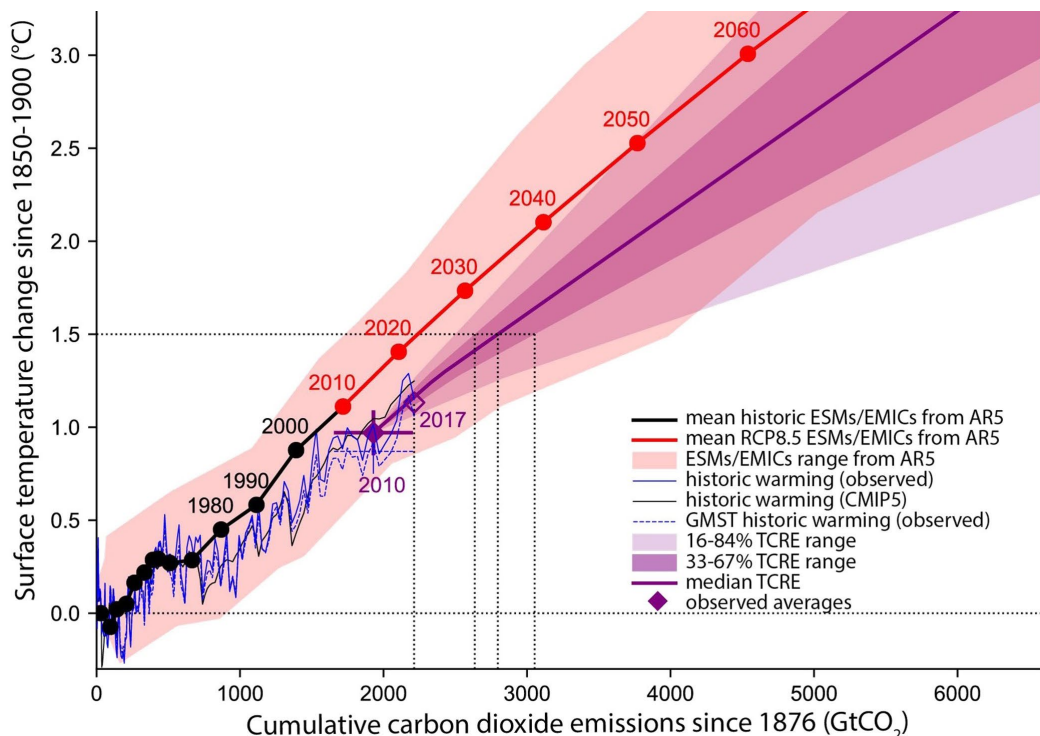


Abbildung 9: IPCC-Klimamodelle zeigen einen direkten Zusammenhang zwischen akkumulierten CO₂-Emissionen und Temperaturanstieg

Viele Maßnahmen zum Klimaschutz haben jedoch eine zeitliche, geographische und/oder sektorale Begrenzung: So gelten EU-Flottenziele beispielsweise nur innerhalb der Europäischen Union. National festgelegte Maßnahmen haben in der Regel einen noch engeren Anwendungsbereich. Darüber hinaus konzentrieren sich die EU-Flottenziele nur auf ein ganz bestimmtes Stadium im Lebenszyklus, d. h. die Fahrzeugnutzung. Die Fahrzeugemissionen im Energie- und Industriesektor werden in diesem Zusammenhang nicht berücksichtigt.

Instrumente, die sich nur auf einzelne Phasen im Lebenszyklus einer Technologie beziehen, schaffen negative Anreize. Denn oftmals wird dabei eine bloße Verlagerung der Emissionen mit einer tatsächlichen Reduzierung gleichgesetzt.

»Vor diesem Hintergrund müssen effektive Maßnahmen zum Klimaschutz immer auf einer umfassenden technologischen Analyse beruhen.«

Abbildung 10 veranschaulicht die große Anzahl an Lebenszyklusphasen, die mindestens berücksichtigt werden müssen, um eine wirklich umfassende Cradle-to-Grave- oder sogar Cradle-to-Cradle-Analyse zu ermöglichen. Neben der eigentlichen Fahrzeugnutzung (Tank-to-Wheel) gehören hierzu insbesondere

- die Herstellung des Fahrzeugs (Cradle-to-Gate)
- die Bereitstellung der Antriebsenergie (Well-to-Tank)
- der Aufbau und Betrieb der notwendigen Infrastruktur (Infrastruktur)
- das Recycling des Fahrzeugs zur Rückgewinnung von Rohstoffen (End-of-Life)

Die Beschränkung der Perspektive auf die reine Nutzung des Fahrzeugs kann zu Fehlanreizen führen, die nicht in Einklang mit den klimapolitischen Zielen stehen. So ist es beispielsweise durchaus möglich, dass mit solchen Instrumenten Technologien gefördert werden, die im Allgemeinen keine Emissionseinsparungen bewirken. Dies hängt damit zusammen, dass die Emissionen innerhalb der engen sektorspezifischen, geografischen und zeitlichen Perspektive geringer ausfallen. Wenn sich die Instrumente nur auf einzelne Phasen des Lebenszyklus einer Technologie beziehen, führt dies zu einer Situation, in der Emissionsverlagerung und Emissionsvermeidung ungerechtfertigterweise auf dieselbe Stufe gestellt werden.

In der Abbildung wird auch die Zuordnung der CO₂-Emissionen in den einzelnen Lebenszyklusphasen zu den verschiedenen Sektoren (Industrie, Energie, Verkehr) deutlich. Dies unterstreicht unsere Feststellung, dass bei der aktuellen branchenspezifischen Ausrichtung klimapolitischer Maßnahmen solche branchenübergreifenden Zusammenhänge weitgehend ignoriert werden.

Die einzelnen Lebenszyklusabschnitte können dabei fast unbegrenzt weit verzweigt sein und die Äste in **Abbildung 10** wurden nur aus pragmatischen Gründen abgeschnitten. Dementsprechend stehen die Studienautoren vor der Herausforderung, diese weitreichenden Effekte zumindest auf aggregierter Ebene zu betrachten. Denn ohne Berücksichtigung der oben dargestellten komplexen Wechselwirkungen

gen lassen sich keine verlässlichen Aussagen über die Vorteile einzelner Antriebsoptionen hinsichtlich der Klimaschutzziele ableiten.

Eine gründliche Bewertung der verfügbaren Technologien sollte zudem auch weitere Nachhaltigkeitseffekte einbeziehen. Wenn eine Antriebstechnologie im Hinblick auf CO₂-Emissionen gute Ergebnisse aufweist, bedeutet dies nicht zwangs-

läufig, dass das auch in Bezug auf andere Nachhaltigkeitsziele der Fall ist. Weitere Aspekte, die zumindest am Rande berücksichtigt werden müssen, sind z. B. die Landnutzung für erneuerbare Energiequellen, lokale Emissionen aus der Fahrzeugnutzung oder das Risiko von Methanleckagen (weitere Beispiele siehe **Abbildung 10** „Weitere punktuell zu beachtende negative Umweltwirkungen“).

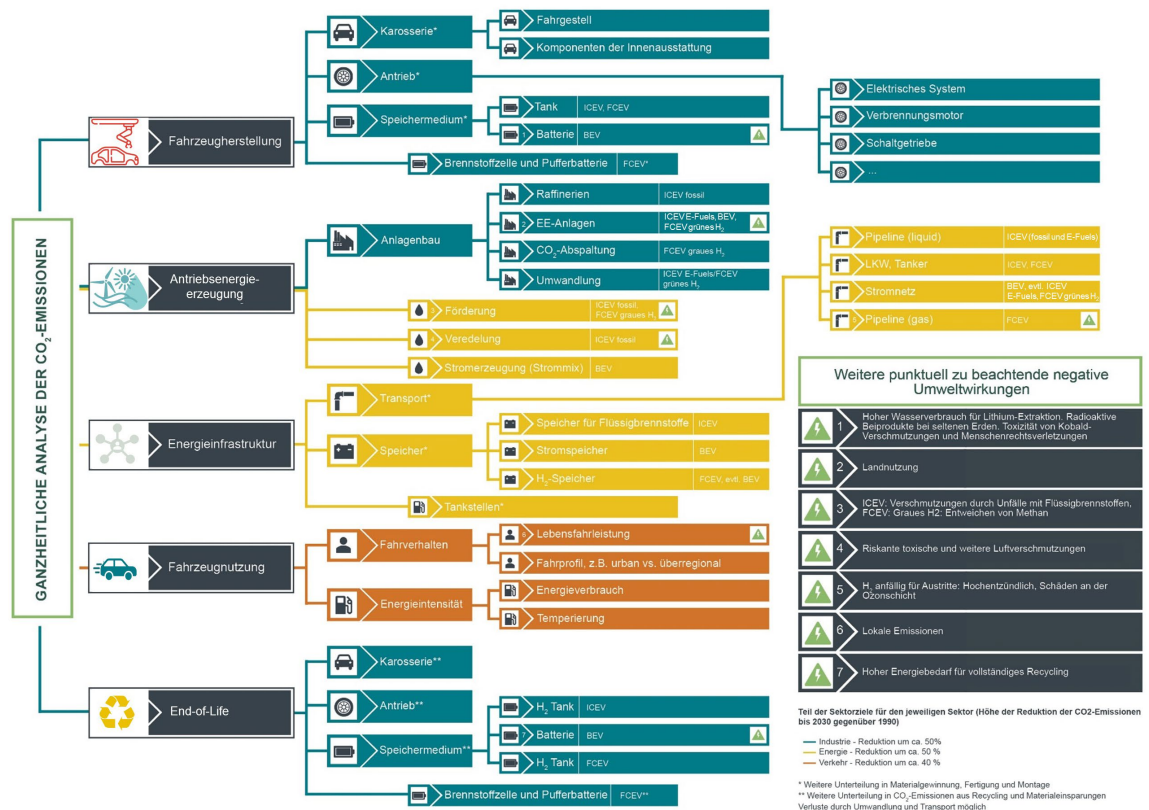


Abbildung 10: Eine umfassende Analyse des CO₂-Fußabdrucks erfordert immer eine detaillierte Betrachtung aller Abschnitte des Lebenszyklus und aller Auswirkungen in vor- und nachgelagerten Sektoren

Der Datenbestand ist zwar groß, Schlüsselinformationen fehlen jedoch immer noch

Die angesprochene umfassende Berücksichtigung der Technologien ist nichts Neues; sie wurde bereits unter der Überschrift „Ökobilanz“ etabliert und auch in einschlägigen Normen (z. B. ISO 140) definiert. Folglich kann beim Vergleich der Antriebstechnologien auf einen großen Datenbestand und umfangreiche Studien zurückgegriffen werden.

Diese umfassende Analyse wird in bestehenden Datenbeständen und Studien oft in einem engeren Sinne interpretiert als in **Abbildung 10** dargestellt. Aus diesem Grund besteht das Ziel der Metaanalyse darin, Antworten auf die folgenden Fragen zu finden:

- Was ist der internationale Forschungsstand für alle Stufen der Wertschöpfung von Antriebskonzepten, die für den jeweiligen Lebenszyklus relevant sind?
- Was kann als gesichertes Wissen angesehen werden und in welchen Bereichen gibt es noch erhebliche Unsicherheiten? Wurden alle relevanten Vorlaufeffekte berücksichtigt oder gibt es noch „weiße Flecken“?
- Welche Bereiche müssen weiter beforscht werden?
- Was lässt sich ausgehend von den vorliegenden Studienergebnissen zu den Vorteilen einzelner Antriebskonzepte sagen?

»Ein umfangreicher Datenbestand birgt eine Fülle von Informationen.«

Für unsere Metaanalyse haben wir 85 Studien identifiziert, die (einen Teil der) Aspekte einer Lebenszyklusanalyse der CO₂-Emissionen von Antriebstechnologien für Personenkraftwagen⁶ untersuchen. Dementsprechend haben wir uns auf thematisch relevante Studien konzentriert. In Fällen, in denen keine Daten vorliegen, wurden zusätzlich auch Analysen verschiedener Komponenten (z. B. zu Batterien oder einzelnen Infrastruk-

turkomponenten) berücksichtigt. Wie in **Abbildung 11** dargestellt, wurden die meisten Studien in den vergangenen 15 Jahren veröffentlicht. Dies hängt damit zusammen, dass alternative Antriebssysteme (wie BEVs oder FCEVs) erst in den letzten Jahren in den Vordergrund gerückt sind. Darüber hinaus haben wir vorrangig Studien mit deutschem oder europäischem Fokus untersucht.

6 Siehe Literatur „In der vorliegenden Metaanalyse berücksichtigte Lebenszyklusanalysen“ für einen Überblick über die einzelnen untersuchten Studien.



Abbildung 11: Es stehen umfassende Quellen mit großen Datenbeständen zur Verfügung – unsere Metaanalyse konzentriert sich auf 85 internationale Studien aus den letzten 15 Jahren

Anmerkung: Die untersuchten Studien beinhalten fast 500 Analysen (z. B. mit unterschiedlichen Strommischen, Wasserstoffproduktionsmethoden, Fahrzeuggrößen) und decken bis zu 10 verschiedene Technologien ab (z. B. BEV, ICEV mit Dieselmotor, ICEV mit Benzinmotor).

»Trotz des großen Datenbestands deckt keine der Studien alle relevanten Aspekte im Detail ab.«

Trotz der umfangreichen Datenbasis (siehe **Abbildung 11**) ist zu bemerken, dass in keiner der untersuchten Studien alle fünf Lebenszyklusphasen berücksichtigt werden, die unserer Ansicht nach für eine aussagekräftige Analyse von Relevanz sind (d. h. Fahrzeugherstellung, Herstellung der Antriebsenergie, Energieinfrastruktur (Ausbau), Fahrzeugnutzung und End-of-Life). Besonders hervorzuheben ist die Tatsache, dass die Infrastruktur zur Energiebereitstellung in der Lebenszyklusanalyse für Fahrzeuge nicht berücksichtigt wird

(siehe **Abbildung 12**). Dies ist möglicherweise auf die oben erwähnte engere Auslegung des Begriffs „Ökobilanz“ und der einschlägigen Normen zurückzuführen. Wenn eine solche umfassende Lebenszyklusanalyse jedoch als Grundlage für sinnvolle klimapolitische Entscheidungen herangezogen werden soll, müssen alle mit der Energieinfrastruktur verbundenen Emissionen berücksichtigt werden – d. h. die Errichtung von Ladesäulen, Wasserstofftankstellen und -netzen sowie die Verluste durch Transport, Speicherung und Energieumwandlung.

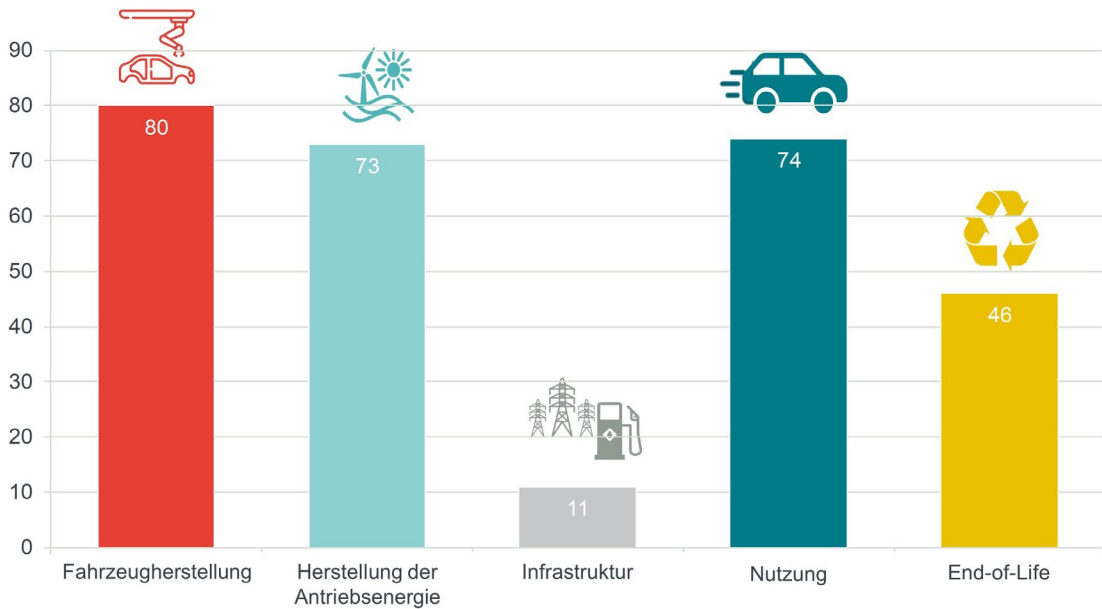


Abbildung 12: Die Energieinfrastruktur bleibt in vielen Lebenszyklusanalysen unberücksichtigt (n = 85 Studien)

Anmerkung: In einigen Lebenszyklusanalysen werden unter Infrastruktur die Emissionen aus der Herstellung und dem Straßenbetrieb gefasst. Da diese für alle Fahrzeugtypen identisch sind, wird letzteres in dieser Studie nicht explizit betrachtet. Die betreffenden Studien wurden jedoch im Balken „Infrastruktur“ erfasst.

»Vergleichbarkeit und Vollständigkeit bleiben eine zentrale Herausforderung.«

Der Verkehrssektor umfasst eine große Vielfalt an möglichen Anwendungsfällen und Rahmenbedingungen, die sich auf die Emissionen der eingesetzten Technologien auswirken: Der klimatische Fußabdruck eines Nutzfahrzeugs mit einer jährlichen Fahrleistung von mehr als 50.000 km ist folglich nicht vergleichbar mit dem Fußabdruck eines Pendlerfahrzeugs, mit dem täglich nur eine begrenzte Strecke zurückgelegt wird. Gleiches gilt für Parameter wie Beladung, Größe, Klima, Reichweite oder die Art der eingesetzten Antriebsenergie (Strommix, Anteil von Biokraftstoffen etc.).

Da Studien auf Annahmen und Szenarien basieren, gestaltet sich die Vergleichbarkeit der Ergebnisse schwierig.

Bei einem **Vergleich** verschiedener Technologien ist zu beachten, dass das spezifische Ergebnis immer auf dem konkreten Anwendungsfall und den jeweils zugrunde liegenden Parametern basiert. In den meisten Studien werden beispielsweise generische Anwendungsfälle mit mittelgroßen Fahrzeugen (z. B. VW Golf), einer eingeschränkten Anforderung bzgl. der Fahrzeugreichweite, einer durchschnittlichen Außentemperatur etc. betrachtet. Dementsprechend werden andere, jedoch übliche Anwendungsfälle – z. B. größere Fahrzeuge mit höherer Nutzlast oder realistischere geografische Bedingungen bzw. Temperaturen – in nur wenigen Studien behandelt. Eine Verallgemeinerung einzelner Studienergebnisse ist daher nur in sehr begrenztem Umfang möglich.

Darüber hinaus können viele aktuell verfügbare Technologien einen Beitrag dazu leisten, die CO₂-Emissionen im Verkehrssektor zu reduzieren.

Einsparungen können beispielsweise durch einen höheren Wirkungsgrad des Antriebs oder durch die Umstellung von fossilen auf CO₂-neutrale Energieträger erzielt werden. Hierzu zählen beispielsweise die Nutzung von regenerativem Ladestrom oder auch E-Kraftstoffe, d. h. flüssige Brennstoffe⁷ und Gase wie Wasserstoff aus erneuerbaren Energiequellen. Dementsprechend stehen zahlreiche unterschiedliche Antriebsarten zur Verfügung: z. B. batteriebetriebene Elektrofahrzeuge (BEVs); hocheffiziente Fahrzeuge mit Verbrennungsmotor (ICEVs), die mit fossilen Kraftstoffen, Biokraftstoffen oder E-Kraftstoffen angetrieben werden, teilweise auch in Kombination mit Hybridfahrzeugen; oder Brennstoffzellenelektrofahrzeuge (FCEVs).

Die **vollständige** Abdeckung aller relevanten Technologien gestaltet sich somit zunehmend schwieriger. Dies erklärt auch den sehr unterschiedlichen Detailgrad in den verschiedenen Studien:

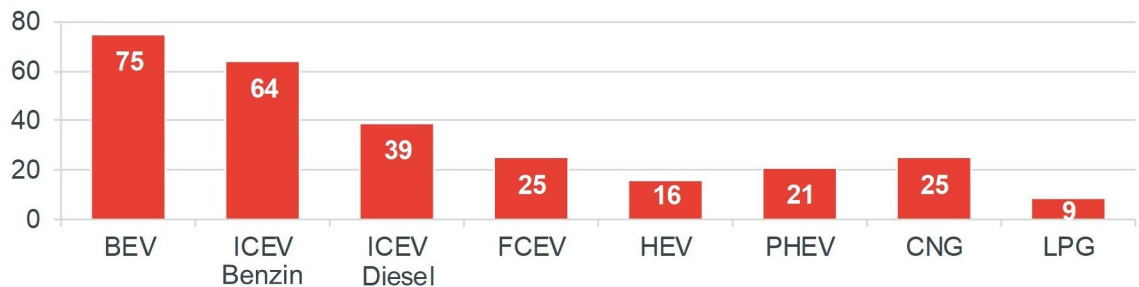


Abbildung 13: Einige Antriebe (ungeachtet möglicher Technologieoptionen) werden nur in wenigen Studien angesprochen.

Anmerkung: Die Grafik zeigt die Anzahl der Studien, in denen die jeweilige Antriebstechnologie analysiert wird. HEV = Hybrid-Elektrofahrzeug, PHEV = Plug-In-Hybrid-Elektrofahrzeug, CNG = Erdgasfahrzeug, LPG = Flüssiggasfahrzeug.

Daher ist neben der Vollständigkeit auch die Vergleichbarkeit in Bezug auf spezifische analytische Details eine Herausforderung. Da die jeweiligen Parameter auf vielen unterschiedlichen Annahmen basieren (z. B. hinsichtlich der technologischen Lebensdauer), sind verschiedene Umrechnungen und Anpassungen erforderlich, um die einzelnen

- Während bestimmten Antriebstechnologien in neueren Studien viel Aufmerksamkeit gewidmet wurde, werden andere Technologien nur selten berücksichtigt. Antriebstechnologien wie BEVs oder ICEVs werden dabei umfassend analysiert, andere Lösungen wie Plug-In-Hybrid-Elektrofahrzeuge oder mit Flüssiggas bzw. komprimiertem Erdgas betriebene Fahrzeuge bleiben hingegen vielerorts unberücksichtigt (siehe **Abbildung 13**).
- Im Allgemeinen gibt es keine Studie, die alle Kraftstoffoptionen einer bestimmten Antriebstechnologie umfassend abdeckt (z. B. kann ein ICEV mit fossilem Diesel, Biodiesel oder erneuerbarem Diesel angetrieben werden). So gibt es nur sehr wenige Studien, in denen die Nutzung von (Plug-In-)Hybriden im Zusammenhang mit E-Kraftstoffen untersucht wird.

Studienergebnisse miteinander vergleichen und weitere Technologien abdecken zu können. Im folgenden Kapitel spielen wir die wichtigsten Schritte durch, um die Daten vergleichbar zu machen und ihre Vollständigkeit zu überprüfen – sowohl im Allgemeinen als auch für die einzelnen Lebenszyklusphasen.

⁷ Die Tank-to-Wheel-Emissionen von E-Kraftstoffen wie E-Diesel und E-Benzin liegen auf dem Niveau der jeweiligen fossilen Äquivalente. Bei der Kraftstoffherstellung (Well-to-Wheel) wird jedoch genauso viel CO₂ aus der Atmosphäre abgefangen (negative Emissionen) wie später emittiert wird. Aus diesem Grund liegen die Nettoemissionen von E-Kraftstoffen bei Null.

Aus Sicht des Klimaschutzes liegt keine der Technologien klar an der Spitze

In den vorliegenden Studien zeigt sich hinsichtlich der Gesamt- CO₂-Emissionen ein sehr heterogenes Bild, bedingt durch die verschiedenen alternativen Antriebsmöglichkeiten im Verkehrssektor. Das Ergebnis lässt sich wie folgt zusammenfassen, weitere Details hierzu folgen in diesem Kapitel:

- Im Hinblick auf die CO₂-Emissionen setzt sich keine der Technologien eindeutig gegenüber den anderen durch. Lebenszyklus-

analysen belegen, dass die CO₂-Emissionen bei vielen der verfügbaren Antriebstechnologien ähnlich ausfallen.

- Allerdings variieren die Emissionen in den unterschiedlichen Lebenszyklusphasen der verfügbaren Technologien erheblich.
- Folglich hängt die Auswahl der vorteilhaftesten Technologie von individuellen Annahmen und spezifischen Rahmenbedingungen ab.

»Die Technologien weisen ähnliche Emissionen auf. Keine Alternative ist eindeutig überlegen.«

Die Lebenszyklusanalysen von batterieelektrischen Fahrzeugen sowie Fahrzeugen mit Verbrennungsmotoren und Brennstoffzellen weisen in vielen Fällen relativ geringfügige Unterschiede auf, die stark von zugrunde liegenden Annahmen abhängig sind. Allerdings ist keine der Technologien deutlich überlegen.

Abbildung 14 fasst die Studienergebnisse zu den gesamten CO₂-Emissionen von Verbrennungsmotoren (sowohl für fossile Kraftstoffe als auch für E-Kraftstoffe), BEVs (mit einem Strommix aus sowohl fossilen Ressourcen als auch Ökostrom) und FCEVs (mit Wasserstoff aus sowohl fossilen als auch erneuerbaren Quellen) über die gesamte Fahrzeuglebensdauer zusammen. Für diese Analyse verwenden wir die Ergebnisse aller überprüften externen Studien und stellen deren Umfang und Verteilung dar:

- Die transparenten Balken im Hintergrund der Abbildung veranschaulichen die mittleren

Emissionen für die jeweilige Lebenszyklusphase.

- Diese Balken folgen der Logik eines Wasserfall-diagramms – gestapelt stellen sie die gesamten CO₂-Emissionen des Fahrzeugs dar. Das bedeutet, dass das obere Ende des transparenten:
 - blauen Balkens den Mittelwert der Studien für die Gesamtemissionen des jeweiligen mit fossilen Energien betriebenen Antriebs anzeigt.
 - grünen Balkens den Mittelwert der Studien für die Gesamtemissionen eines mit erneuerbarer Energie betriebenen Antriebs veranschaulicht.
- Die undurchsichtigen Balken zeigen an, wie die Ergebnisse in den Studien über die einzelnen Lebenszyklusphasen verteilt sind. Die Werte basieren auf den mittleren 50 % aller Studienergebnisse für die jeweilige Lebenszyklusphase. Die Bandbreite dieser Ergebnisse ist bereits sehr groß, nicht zuletzt aufgrund der unterschiedlichen Annahmen und Szenarien in den verschiedenen Studien. Der Begriff „Variation“ beschreibt

in diesem Zusammenhang den absoluten Abstand zwischen dem oberen und dem unteren Rand der undurchsichtigen Balken.

- Die dünnen grauen Striche, die aus den Balken herausragen, erweitern den Bereich über die gesamte Bandbreite und stellen die maximalen und minimalen Ergebnisse für die jeweilige Lebenszyklusphase dar.

Um die Vergleichbarkeit zu gewährleisten, wurden die Ergebnisse auf eine Lebensfahrleistung von 150.000 km skaliert, ansonsten aber unverändert belassen. Die Annahmen unterscheiden sich in Bezug auf Fahrzeuge (z. B. Größe oder Typ/Art), Rahmenbedingungen (z. B. Strommix oder Topographie) und Szenarien (z. B. Verwendungszweck), sodass die Studien nicht vollständig vergleichbar sind. Darüber hinaus erfüllen die Studien nicht die oben genannten Anforderungen an eine vollständige und umfassende Analyse. Häufig werden CO₂-Emissionen in anderen Sektoren ausgeschlossen – so wird z. B. die Energieinfrastruktur in keiner der Studien detailliert analysiert.

Auch wenn die meisten Studien keine umfassende Analyse darstellen und somit kein vollständiges Bild zeichnen können, lassen sich daraus einige erste Erkenntnisse ableiten, siehe **Abbildung 14**:

- **Kein klarer „Gewinner“:** Abhängig von der jeweiligen Studie weisen verschiedene Antriebstechnologien niedrige Emissionen über den Lebenszyklus auf, aber es gibt keine Technologie, die sich klar gegenüber den anderen durchsetzt. Bei Antriebstechnologien mit teilweise fossilen Energien liegen die mittleren Gesamtemissionen über die Lebensdauer im Bereich von 25–35 t CO₂, allerdings mit erheblicher Unsicherheit (siehe unten). Bei Nutzung erneuerbarer Energien liegen die Gesamtemissionen bei 9–16 t CO₂.
- **Hohe Unsicherheit:** Die Ergebnisse für einzelne Technologien fallen jedoch über alle Studien hinweg enorm unterschiedlich aus. Die Unterschiede zwischen den minimalen und maximalen Ergebnissen gehen dabei oft weit über den gesamten Emissionsmedian hinaus. Dies hängt teilweise mit den zugrunde liegenden Szenarien zusammen: Verschiedene Anwendungen im Verkehrssektor führen zu zahlreichen Einzelfällen, in denen unterschiedliche Faktoren die Gesamt-CO₂-Bilanz beeinflussen. Einige Einflussfaktoren wie der Energie- oder Strommix wirken sich auf alle Phasen des Lebenszyklus aus. Andere Einflussfaktoren wie Fahrzeuggröße, Verbrauch und Fahrleistung sind spezifisch für einige Lebenszyklusphasen der Technologie.
- **Die Fahrzeugherstellung und die „Well-to-Wheel“-Phase (Kombination aus Kraftstoffproduktion und Nutzungsphase) sind die wichtigsten Emissionsfaktoren:** Bei Fahrzeugen, die mit fossilen Kraftstoffen betrieben werden oder deren Antriebsstrom hauptsächlich aus fossilen Ressourcen erzeugt wird, decken die beiden Phasen Fahrzeugherstellung und Well-to-Wheel den größten Teil der Gesamtemissionen bei allen Antriebstechnologien ab. Bei erneuerbaren Energiequellen zeichnet sich jedoch ein anderes Bild: In Studien zu solchen „grünen“ Szenarien gehen die Emissionen während der Well-to-Wheel-Phase des Fahrzeugs deutlich zurück, sodass die Fahrzeugherstellung der Hauptemissionstreiber bleibt (allerdings ist anzumerken, dass in nur sehr wenigen Studien die Auswirkungen der zunehmenden Nutzung erneuerbarer Energiequellen auf den CO₂-Fußabdruck der Fahrzeugherstellung berücksichtigt werden – in einer vollständig defossilisierten Welt dürften die Emissionen bei der Fahrzeugherstellung unabhängig von der Antriebstechnologie ebenfalls bei nahe Null liegen).
- **Infrastrukturemissionen werden oft vernachlässigt:** Wie **Abbildung 12** zeigt, enthalten viele Studien keine Analyse der Emissionen, die beim Aufbau der erforderlichen (Energie-)Infrastruktur entstehen. In **Abbildung 14** ist daher nur ein Platzhalter zur Veranschaulichung der bestehenden Informationslücke enthalten. Alle zuvor dargestellten Schlussfolgerungen basieren allerdings auf dem Vorbehalt, dass eine vollständige Analyse der Infrastruktur noch aussteht.



Abbildung 14: Auf Grundlage einer Lebenszyklusanalyse weisen verschiedene Antriebskonzepte ähnliche Gesamtemissionen auf

Anmerkung: Um eine grobe Vergleichbarkeit zu gewährleisten, wurden die Studienergebnisse auf eine maximale Laufleistung von 150.000 km skaliert.

»Emissionen treten bei den unterschiedlichen Antriebstechnologien in unterschiedlichen Lebenszyklusphasen auf.«

Der Vergleich verschiedener Antriebe in **Abbildung 14** zeigt, dass trotz relativ ähnlicher Gesamtemissionen über den Lebenszyklus der verschiedenen Antriebsarten (unter Berücksichtigung der großen überlappenden Bandbreite der Ergebnisse) die Art und Weise, wie diese Emissionen über den Lebenszyklus verteilt sind, zwischen den verschiedenen Technologien erheblich variiert:

- Die Emissionen aus dem Fahrzeugbau (rote Balken in **Abbildung 14**) sind bei BEVs und FCEVs vergleichsweise hoch.
- Die Well-to-Wheel-Emissionen sind:
 - bei ICEVs (der Mittelwert der Studien liegt bei 23 t CO₂ pro Fahrzeug) und FCEVs (der Mittelwert der Studien liegt bei 22 t CO₂ pro Fahrzeug – obwohl diese Ergebnisse auf einer sehr begrenzten Studienanzahl beruhen und insbesondere von Annahmen über die Herkunft des Wasserstoffs geprägt sind) höher als bei BEVs (der Mittelwert der Studien liegt bei 15 t CO₂ pro Fahrzeug), wenn fossile Kraftstoffe und ein nicht zu 100 % erneuerbarer Strommix verwendet werden (dunkelblaue Balken).
- im Allgemeinen bei allen drei Technologien weitaus geringer, wenn die Fahrzeuge mit E-Diesel (Mittelwert von 2,5 t CO₂ pro Fahrzeug), grünem H₂ (Mittelwert von 3,3 t CO₂ pro Fahrzeug) bzw. Ladestrom mit nahezu null CO₂-Emissionen (Mittelwert von 0,8 t CO₂ pro Fahrzeug) betrieben werden⁸.
- Während der Infrastruktursektor in Studien zur Lebenszyklusanalyse nicht berücksichtigt wurde, wären auch hier Unterschiede zwischen den einzelnen Antriebstechnologien zu erwarten.
- Die Emissionen am Ende des Lebenszyklus unterscheiden sich etwas, aber insgesamt in einer anderen Größenordnung als in anderen Lebenszyklusphasen.

Im folgenden Abschnitt erörtern wir die wichtigsten Einflussfaktoren und Ergebnisse für die einzelnen Lebenszyklusphasen im Detail. Die Unterschiede zwischen den Technologien wirken sich nachteilig auf die Wirksamkeit eng fokussierter klimapolitischer Maßnahmen aus und können zu erheblichen Verzerrungen und Fehlanreizen führen, auf die wir am Ende dieses Unterkapitels näher eingehen werden.

»Die Emissionen bei der Fahrzeugherstellung sind bei BEVs und FCEVs höher als bei ICEVs.«

Abbildung 15 zeigt einen Vergleich der Emissionen in der Lebenszyklusphase „Fahrzeugherstellung“ für ICEVs (benzin- und dieselbetriebene Fahrzeuge), BEVs und FCEVs.

ähnlichen Größenordnung, wobei die meisten Unterschiede auf unterschiedliche Karosseriegößen und Unterschiede im Volumen und Ursprung des benötigten Stahls zurückgeführt werden können.

Die einmaligen Emissionen aus der Herstellung von **ICEVs** liegen in allen analysierten Studien in einer

Im Vergleich dazu liegen die einmaligen Emissionen von **BEVs** tendenziell deutlich höher als bei ICEVs.

⁸ Bei ansonsten gleichen Voraussetzungen sollten die Emissionen von ICEVs mit E-Kraftstoffen und die Emissionen von FCEVs und BEVs, die mit 100 % Ökostrom betrieben werden, theoretisch gleich niedrig oder sogar null sein. In der Praxis sind die Voraussetzungen jedoch nicht identisch und Unterschiede entstehen aufgrund verschiedener Grundannahmen, wie z. B. der jeweiligen CO₂-Emissionen für den Aufbau von Anlagen zur Generation erneuerbarer Energien (z. B. Windparks, die zur Erzeugung von erneuerbarem Ladestrom und erneuerbarem E-Kraftstoff genutzt werden).

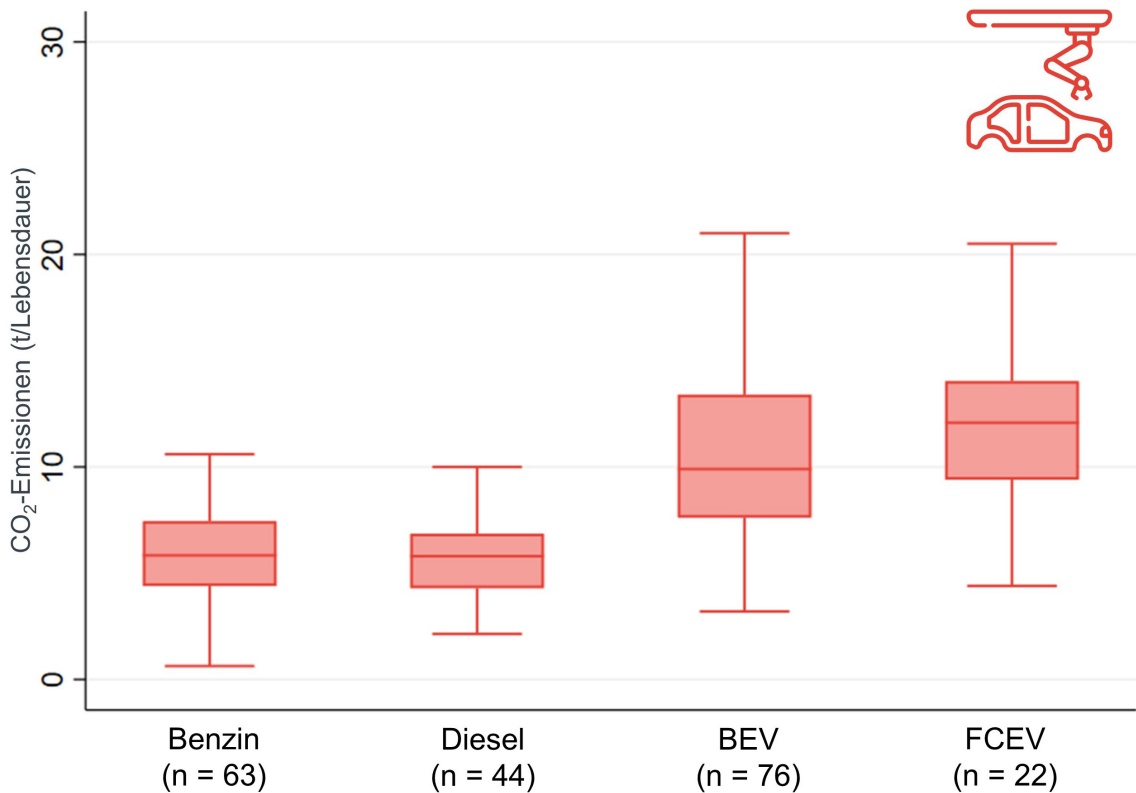


Abbildung 15: Batterie- und Brennstoffzellenproduktion sind zentrale Faktoren für Emissionen bei der Fahrzeugherstellung

Anmerkung: CO₂-Emissionen werden in Tonnen pro Lebensdauer gemessen.

Dies liegt daran, dass für die Herstellung von BEVs nicht nur die Emissionen aus der Stahlproduktion einbezogen werden, sondern auch die Batterieherstellung einen großen Einfluss hat. Die Herstellung von Batterien ist ein energieintensiver Prozess mit entsprechend hohen Klimaauswirkungen. Je höher die erforderliche Batteriekapazität und je CO₂-intensiver der Strommix im Herstellungsland, desto höher sind die CO₂-Emissionen, die allein bei der Herstellung der Batterie entstehen.

Die **Batteriekapazität** eines Fahrzeugs ist ein entscheidender Parameter für die Gesamtemissionen, hängt aber direkt vom angenommenen Nutzungsmuster ab. Folglich gibt es mit der Batterietechnologie einen neuen Freiheitsgrad bei der Fahrzeugkonfiguration, der für Fahrzeuge mit Verbrennungsmotor irrelevant ist und den Vergleich einzelner Fahrzeuge erschwert: Bei Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor bestimmt sich die Fahrzeugreichweite allein

durch das Tankvolumen und schlägt daher (im Vergleich zu anderen Kostenfaktoren) fast nicht zu Buche. Die Fahrzeuge wurden in der Regel als „Allrounder“ mit großer Reichweite geplant. Bei einem BEV wird jedoch die Reichweite des Fahrzeugs (welche die Batteriekapazität bestimmt) zu einem der wichtigsten Kostentreiber, d. h. die geplante Reichweite wird bei einem BEV je nach Anwendung wesentlich stärker differenziert. Dementsprechend hängen die Emissionen über den Lebenszyklus (die ebenfalls weitestgehend von der Batteriekapazität bestimmt werden) bei BEVs maßgeblich davon ab, ob die Fahrzeuge für eine niedrige oder eine hohe Reichweite ausgelegt sind. Bei einem Fahrzeug mit Verbrennungsmotor bleiben die Emissionen hingegen nahezu konstant. Vor diesem Hintergrund hängen die Relativitäten zwischen beiden Antriebstechnologien stark von den jeweiligen Anwendungsfällen ab (und davon, inwieweit die Fahrzeuge auf diesen speziellen Anwendungsfall zugeschnitten sind).

Ähnliche Feststellungen gelten für den **Produktionsstandort**: Derzeit werden die meisten Batterien in Asien hergestellt, d. h. in China, Japan und Südkorea. In diesen Ländern wird bei der Batterieherstellung aufgrund des dort vorherrschenden Strommixes deutlich mehr CO₂ emittiert als in Europa⁹ (auch hier gibt es Unterschiede in Sachen Nachhaltigkeit).

Der Mittelwert der Emissionen für die Herstellung von **FCEVs** liegt tendenziell sogar über dem von BEVs. Zu den wichtigsten Faktoren für den hohen Emissionsgrad von FCEVs in den Studienergebnissen zählen die energieintensive Herstellung der Brennstoffzelle und – in geringerem Maße – des Wasserstofftanks. Die Aussagekraft der FCEV-Ergebnisse ist jedoch begrenzt, zum einen aufgrund der im Vergleich zu den anderen Fahrzeugen deutlich geringeren Stichprobengröße und zum anderen aufgrund der Tatsache, dass die Variation – und damit die Ergebnisunsicherheit – bei FCEVs am größten ist. Gründe für die Variation sind:

- der unterschiedliche Strommix in den Ländern, in denen Brennstoffzellen produziert werden. Die meisten Brennstoffzellen werden in Japan oder in den USA produziert, aber auch in europäischen Ländern wie Frankreich und Deutschland.

- Leistungsunterschiede bei Brennstoffzellen: Während die in den Studien angenommenen Wasserstofftankgrößen nicht wesentlich variieren (entsprechend etwa 5 kg Wasserstoff), reichen die Spitzenleistungen der Brennstoffzellen von 46 kW¹⁰ bis hin zu über 120 kW¹¹ – und je höher die Leistung, desto höher die Emissionen.
- Nicht standardisierte Produktionsprozesse: Brennstoffzellen sind immer noch kein Massenprodukt, da nur wenige Fahrzeugserien auf dem Markt sind und die Herstellungsprozesse noch nicht vollständig kommerzialisiert sind.¹²

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass die Emissionen aus der Fahrzeugherstellung bei BEVs und FCEVs aufgrund des zusätzlichen Aufwands zur Herstellung der Batterie oder Brennstoffzelle höher ausfallen als bei ICEVs. Der Vergleich zwischen den Technologien gestaltet sich aufgrund verschiedener Faktoren jedoch schwierig. Eine Herausforderung besteht darin, einen angemessenen Vergleich zwischen ICEVs, die als Allrounder für verschiedene Verwendungszwecke dienen, und BEVs zu ziehen, die spezifischere Nutzungsanforderungen aufweisen. Zudem ist es nicht ganz einfach, vergleichbare FCEVs und BEVs zu finden, da es derzeit nur FCEVs der Mittel- und Oberklasse gibt.

»Die Emissionen aus der Kraftstoffherstellung und der Fahrzeugnutzung (Well-to-Wheel) sind bei ICEVs tendenziell höher.«

Abbildung 16 vergleicht die Well-to-Wheel-Emissionen für benzin- und dieselbetriebene ICEVs, BEVs und FCEVs. In der Abbildung wird deutlich, dass die meisten Studien davon ausgehen, dass die höchsten Well-to-Wheel-Emissionen auf ICEV mit fossilen Brennstoffen zurückgehen. Anhand der Variation zeigt sich jedoch, dass insbesondere bei FCEVs

nach wie vor große Unsicherheiten bestehen. Die Emissionen von benzinbetriebenen **ICEVs** sind höher als die von dieselbetriebenen ICEVs. Dies hängt mit dem höheren Wirkungsgrad von Dieselmotoren zusammen. Bei beiden ICEV-Technologien geht die Variation der Gesamtemissionen auf die folgenden Faktoren zurück:

9 Siehe Chuang et al. (2018), S. 425, und EEA (2020), [https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/daviz/co2-emission-intensity-5#tab-googlechartid_chart_11_filters=%7B%22rowFilters%22%3A%7B%7D%3B%22columnFilters%22%3A%7B%22pre_config_ugeo%22%3A%5B%22European%20Union%20\(current%20composition\)%22%5D%7D%7D](https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/daviz/co2-emission-intensity-5#tab-googlechartid_chart_11_filters=%7B%22rowFilters%22%3A%7B%7D%3B%22columnFilters%22%3A%7B%22pre_config_ugeo%22%3A%5B%22European%20Union%20(current%20composition)%22%5D%7D%7D), abgerufen am 07.01.2020

10 Siehe Simons und Bauer (2015).

11 Siehe Bauer et al. (2015).

12 Siehe Evangelisti et al. (2017).

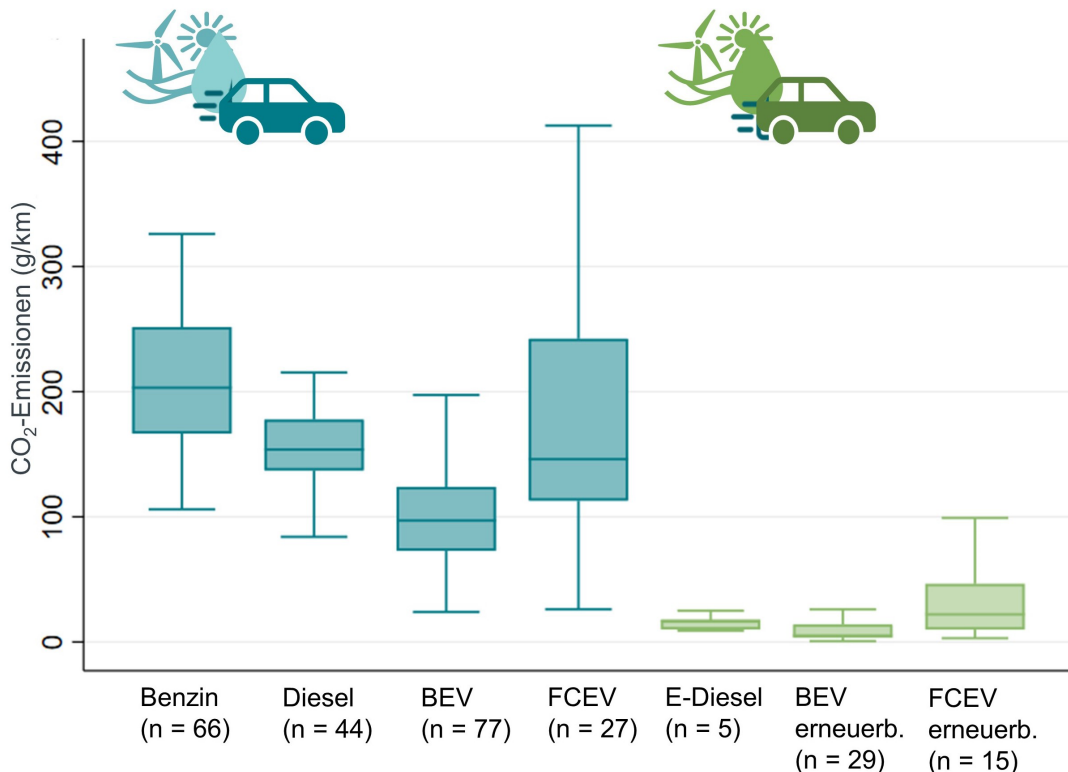


Abbildung 16: Strommix und Verbrauch sind ausschlaggebend für Well-to-Wheel-Emissionen

Anmerkung: CO₂-Emissionen werden in Tonnen pro Lebensdauer gemessen.

- Variation der Well-to-Tank-Emissionen: Die Well-to-Tank-Emissionen von ICEV decken theoretisch die Produktion von Benzin oder Diesel ab und reichen von der Kraftstoffgewinnung über die Verarbeitung/Raffination bis hin zum Transport. In den einzelnen Studien werden jedoch verschiedene Teile der vorgelagerten Kette betrachtet.
- Variation der Tank-to-Wheel-Emissionen: Der Verbrauch steigt mit Größe und Gewicht der Fahrzeuge.

Die meisten Studien basieren auf der Annahme, dass ICEVs ausschließlich mit fossilen Kraftstoffen betrieben werden. Einige wenige Studien berücksichtigen jedoch auch klimaneutrale Kraftstoffe, z. B. Biokraftstoffe oder synthetische Sorten aus erneuerbaren Energiequellen. Diese Studien werden

in **Abbildung 16** getrennt dargestellt. Die Ergebnisse zeigen, dass die Well-to-Wheel-Emissionen von ICEVs bei Verwendung von klimaneutralen Kraftstoffen um 90 % niedriger ausfallen.

Well-to-Wheel-Emissionen von **BEVs** werden – wie bei Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor – durch Fahrzeuggröße und -gewicht bestimmt. Allerdings handelt es sich bei den Emissionen um reine Well-to-Tank-Emissionen¹³, da BEVs während der Nutzungsphase emissionsfrei sind und überwiegend durch den zum Aufladen des Fahrzeugs verwendeten Strommix bestimmt werden. Die Well-to-Wheel-Emissionen für BEVs können nur dann auf nahezu Null gesenkt werden, wenn der Strom zu 100 % aus erneuerbaren Quellen erzeugt wird. Einige Studien gehen bereits von einem solchen Ökostrom-Mix für die Aufladung aus, andere betrachten den tatsächli-

¹³ Ladeverluste werden in den Studien in der Regel allerdings nicht berücksichtigt.

chen Strommix in bestimmten Ländern wie Deutschland, Frankreich oder den Vereinigten Staaten. In den meisten Studien wird nicht berücksichtigt, dass auch bei Ökostrom die Emissionen aus dem Bau von Anlagen zur Erzeugung von Strom aus erneuerbaren Energiequellen einbezogen werden sollten. Wie aus mehreren Metaanalysen der CO₂-Emissionen über den Lebenszyklus von EE-Anlagen hervorgeht, sind die Auswirkungen im Allgemeinen erheblich und daher auch ausschlaggebend für die Emissionen von Fahrzeugen, die direkt oder indirekt (durch Umwandlung in E-Kraftstoffe) Strom aus erneuerbaren Energiequellen beziehen.¹⁴ Allerdings sind die Gesamtemissionen im Vergleich zu den Lebenszyklusemissionen z. B. eines Kohlekraftwerks eher gering.¹⁵

Die Well-to-Wheel-Emissionen von FCEVs – ebenso wie BEVs sind FCEVs in der Nutzungsphase emissionsfrei – sind tendenziell niedriger als die von ICEVs, liegen aber über denen von BEVs. Die Variation ist jedoch auffallend und hauptsächlich auf die unterschiedlichen Herstellungsmethoden für Wasserstoff mit unterschiedlichen CO₂-Emissionen zurückzuführen. In den Studien werden verschiedene Verfahren zur Herstellung von Wasserstoff betrachtet, d. h. die Abtrennung von Wasserstoff aus Erdgas durch Dampfreformierung – entweder

mittels Kohlenstoffabscheidung und -speicherung (oft als „blauer Wasserstoff“ bezeichnet) oder ohne („grauer Wasserstoff“) – oder durch Elektrolyse (oft als „grüner Wasserstoff“ bezeichnet). Bei einer Herstellung mittels Elektrolyse werden in den Studien auch unterschiedliche Strommixe berücksichtigt. Aus diesem Grund variieren auch die resultierenden CO₂-Emissionen bei der Wasserstoffproduktion nach diesem Verfahren.

Insgesamt zeigen die Variationen der Well-to-Wheel-Emissionen für alle Technologien, dass die aktuellen Emissionen je nach Fahrzeugtyp und Fahrverhalten variieren. Diese Unterschiede werden durch unterschiedliche regionale Gegebenheiten wie den Strom- oder Kraftstoffmix sogar noch verstärkt. Für die Zukunft ist ein gegenläufiger Trend zu erwarten: Da immer mehr Antriebsenergie – unabhängig von der Technologie – aus erneuerbaren Quellen erzeugt wird, werden die Unterschiede zwischen den Fahrzeugtypen und dem Nutzungsverhalten abnehmen oder möglicherweise sogar vollständig aufgehoben. Bei BEVs können Emissionen z. B. durch verstärkte Nutzung von grünem Ladestrom reduziert werden, während Emissionen bei ICEVs und FCEVs durch Beimischung von regenerativ erzeugten E-Kraftstoffen gesenkt werden können.

»Insbesondere bei strombasierten alternativen Antriebstechnologien entstehen Emissionen beim Aufbau der Infrastruktur.«

Wie in Kapitel 2 Motivation und Herangehensweise, Abschnitt „Für eine nachhaltige Technologieauswahl braucht es eine umfassende branchenübergreifende, globale und intertemporale Lebenszyklusanalyse“, erläutert wurde, bleibt die Energieinfrastruktur in vielen Lebenszyklusanalysen von Fahrzeugen unberücksichtigt. Dementsprechend fehlt es den Daten, die als Benchmark für unsere

Metaanalyse herangezogen werden, in diesem Zusammenhang etwas an Tiefe. Gleichwohl ist dieser Aspekt allerdings wichtig für die Technologieauswahl.

Dieser weiße Fleck bzw. die Lücke lässt sich nur schwer beheben und erfordert umfangreiche Forschungsaktivitäten. Tatsächlich sind möglicher-

¹⁴ Lebenszyklusemissionen für PV-Anlagen reichen von 1 bis 300 g CO₂-Äq/kWh, für Onshore-Windkraftanlagen von 0,43 bis 220 g CO₂-Äq/kWh und Offshore-Windkraftanlagen von 3,2 bis 29,7 g CO₂-Äq/kWh. Siehe IPCC (2014), Nugent und Sovacool (2014), Amponsah et al. (2014), Kadiyala, Kommalapati und Huque (2017) und Kommalapati et al. (2017). Ein Mittelwert von 100 g CO₂-Äq/kWh würde beispielsweise zu Emissionen von bis zu 13 % der Gesamt-CO₂-Emissionen eines BEV führen.

¹⁵ Ein Kohlekraftwerk produziert 675-1689 g CO₂-Äq/kWh im Lauf seiner Lebensdauer. Siehe IPCC (2014), S. 538.

	ICEV fossil	ICEV E-Kraftstoffe	BEV	FCEV grauer H ₂	FCEV grüner H ₂
Pipelines für Flüssigstoffe	✓	✓			
Pipelines für Gase				✓	✓
Lkw	✓	✓		✗	✗
Tanklaster	✓	✓		✓	✓
Stromnetz		✗	✗		✗
Lagerung von Flüssigstoffen	✓	✓			
Stromspeicherung			✗		
H ₂ -Speicherung				✓	✓
Tankstellen	✓	✓		✗	✗
Ladestationen			✗		



 Verfügbare Infrastruktur
  Fehlende Infrastruktur

Abbildung 17: Ob ein Infrastrukturausbau erforderlich ist, hängt von der bestehenden Infrastruktur und eventuellen Lücken ab

Anmerkung: Eine gewisse Menge an Stromspeicherung wird wahrscheinlich auch für E-Kraftstoffe und grünes H₂ erforderlich sein, allerdings in weitaus geringerem Maß als bei BEVs. Aus diesem Grund wird dieser Aspekt im Hinblick auf ICEVs mit E-Kraftstoffen und FCEVs mit grünem H₂ im Folgenden nicht berücksichtigt.

weise mehrere Studien erforderlich, um einen speziellen Fokus auf die Infrastruktur zu legen und die Emissionen im Zusammenhang mit dem Aufbau der Energieinfrastruktur für den Verkehrssektor (z. B. Tankstellen und Ladestationen sowie Ausbau des Energienetzes) zu bewerten. Obwohl wir nicht auf aussagekräftige Daten zurückgreifen können, versuchen wir in diesem Abschnitt dennoch, eine grobe Überschlagsanalyse zur Schätzung der betreffenden Emissionen vorzunehmen. Diese Analyse bildet ein grobes Mosaik und basiert auf den Ergebnissen mehrerer Studien mit individuellen spezifischen Schwerpunkten.¹⁶

Hier kann die Größenordnung in der Tat erheblich sein, nämlich – je nach Art der Antriebstechnologie – zwischen 0 und 2,8 t CO₂-Äq pro Pkw und damit zwischen 5 und 8 % der Gesamtemissionen. Das bedeutet, dass die Emissionen in der Lebenszyklusanalyse berücksichtigt werden sollten. Abhängig von der betrachteten Antriebstechnologie gibt es Unterschiede hinsichtlich der Anzahl der Elemente

und der jeweiligen Bedeutung, wie in **Abbildung 17** dargestellt.

Für eine groß angelegte Einführung von **BEVs** ist zusätzliche Infrastruktur (z. B. Ladestationen, Netzausbau oder zusätzliche Stromspeicheranlagen) unter Umständen unerlässlich. Die folgenden groben Schätzungen deuten darauf hin, dass die CO₂-Emissionen für den Aufbau einer BEV-Infrastruktur möglicherweise in einer Größenordnung von bis zu **2 t CO₂** liegen, gerechnet auf die Lebensdauer eines Fahrzeugs (siehe **Abbildung 18**). Dies entspricht bis zu **7,3 %** der gesamten CO₂-Emissionen eines BEV.

- Die auf ausgewählten Studien basierenden Schätzungen der Emissionen für den Bau und Betrieb von **Ladestationen** reichen von **0,06** (niedrigster Wert) bis hin zu **0,45 t CO₂-Äq** (höchster Wert), gerechnet auf die Lebensdauer eines BEV. Die große Spanne ergibt sich zum einen aus den ver-

¹⁶ Eine detaillierte Literaturübersicht für alle Elemente der Energieinfrastruktur ist demnach nicht Bestandteil dieser Studie. Wir konzentrieren uns z. B. auf neuere Studien.

schiedenen Arten von Ladestationen (Wechselstrom privat, Wechselstrom öffentlich, Gleichstrom öffentlich) und zum anderen aus unterschiedlichen Schätzungen für die prognostizierte Gesamtzahl der benötigten Ladestationen pro BEV¹⁷.

- Der Ausbau des **Stromnetzes** aufgrund der Einführung von BEVs wird wahrscheinlich weitere CO₂-Emissionen verursachen¹⁸. Auf der Grundlage mehrerer Studien und weiterer Annahmen gehen wir davon aus, dass die Emissionen zwischen **0,02 kg CO₂-Äq** (bester Fall für Übertragungsnetze) und **0,48 t CO₂-Äq** (Wert für Verteilungsnetze) liegen werden. Diese Schätzung basiert auf dem Stromverbrauch während der Lebensdauer eines BEV¹⁹. Schließlich ist zu beachten, dass die oben angegebenen Werte aufgrund des zeitlich vorgezogenen Baus der Leitungen möglicherweise unter den tatsächlichen Emissionen liegen. Dies hängt damit zusammen, dass die CO₂-Emissionen in Studien über die Lebensdauer der Stromleitungen von 40 bis 100 Jahren²⁰ abgeschrieben werden.

- Die **Stromspeicherung** ist erforderlich, um die Stromversorgung (insbesondere aus intermittierenden erneuerbaren Energiequellen) sicherzustellen. Die Nachfrage ist zeitlich angeglichen – entweder kurz- oder langfristig. Aufgrund des zusätzlichen Strombedarfs für BEVs wird wahrscheinlich auch der systemweite Speicherbedarf steigen. Die Emissionen für Stromspeicher, die zur Abdeckung der Nachfrage bei BEV gebaut werden, liegen in Abhängigkeit von den angenommenen CO₂-Emissionen pro Speichertechnologie²¹ sowie von der erforderlichen Speicherung²² voraussichtlich **zwischen 0 und mehr als 1 t CO₂-Äq pro BEV**.

FCEVs erfordern den Bau von Wasserstofftankstellen, eine (größere) Lkw-Flotte für den Transport von H₂ zu den Tankstellen und – für grünen Wasserstoff – möglicherweise einen Ausbau des Stromnetzes. Es gibt zudem auch andere Arten von Infrastruktur, diese müssen aber technisch angepasst werden, um die Kompatibilität mit H₂ zu gewährleisten, z. B. Gaspipelines, Tankwagen²³ und Speichermöglichkeiten. Insgesamt ergibt sich über die

17 Lucas, Silva und Neto (2012), Bünger et al. (2019) und Robinius et al. (2018).

18 Eine Metastudie der FGH (FGH 2018) mit einem Forschungsüberblick über die Netzintegration in der Elektromobilität kam zu dem Schluss, dass der Netzausbau in nur wenigen Studien quantifiziert wird und eine Verallgemeinerung aufgrund der Konzentration auf ausgewählte Modellnetze schwierig ist. Ein Jahr später kam man bei Navigant, Kompetenzzentrum Elektromobilität und RE-xpertise (2019) zu dem Schluss, dass je nach gewähltem Szenario in Deutschland ein umfassender Netzausbau erforderlich ist.

19 Diese Werte stammen aus Studien, die CO₂-Emissionen über den Lebenszyklus von Stromleitungen analysieren und typischerweise CO₂-Emissionen pro MWh angeben (Jorge und Hertwich (2013), Arvesen et al. (2015), Harrison et al. (2010), Turconi et al. (2014) und Madrigal und Spalding-Fecher (2010)). Da wir davon ausgehen, dass 50 % des Stromnetzes bereits vorhanden ist, reduzieren wir die Werte für CO₂-Emissionen pro MWh um 50 %. Der tatsächliche Emissionswert hängt jedoch größtenteils von der Anzahl der BEVs, der angenommenen Lademuster sowie davon ab, ob das Aufladen kontrolliert oder unkontrolliert abläuft. Siehe z. B. Navigant, Kompetenzzentrum Elektromobilität und RE-xpertise (2019) und FGH (2018).

20 Die meisten Studien beziehen sich auf eine Lebenszeit von 40 Jahren, Jorge und Hertwich (2013) sogar auf 100 Jahre.

21 CO₂-Emissionen aus dem Bau und Betrieb von Speicherlagern variieren je nach Art der Lagerung und reichen – nach Mostert et al (2018) – von 9 kg CO₂-Äq pro gelagerter MWh(el) bei Second-Life-Batterien bis hin zu 176 kg CO₂-Äq pro gelagerter MWh(el) bei Natrium-Schwefel-Batterien. Denholm und Kulcinski (2003) geben höhere Werte für Einzelbatterien an, dies ist aber ggf. auf die technologische Entwicklung zurückzuführen. Die Werte bleiben innerhalb des oben angegebenen Bereichs. Unter der Annahme, dass nur 25 % der neuen Speicherkapazität gebaut werden müssen, da die BEVs selbst auch einen Teil der Speicherkapazität bereitstellen, liegen die Emissionen zwischen 2,25 und 44 kg CO₂-Äq/MWh für BEVs in dieser Kategorie.

22 Pro BEV müssen 0 bis 24 MWh gespeichert werden. Dabei gehen wir zunächst von einem Gesamtverbrauch von 33,6 MWh Strom über die Lebensdauer aus (basierend auf einer Laufleistung von 150.000 km und einem Verbrauch von 0,224 kWh/km – einschließlich Ladeverluste und Strom für Klimatisierung und Elektronik). Zweitens gehen wir davon aus, dass im besten Fall 0 % dieses Stroms vorher gespeichert werden müssen (0 MWh(el)) und im schlechtesten Fall 70 % (24 MWh(el)).

23 Transport per Tankwagen kann durch Hydrierung und Dehydrierung mit einem flüssigen organischen Wasserstoffträger erfolgen. Wenn Dibenzyltoluol verwendet wird, ist die Handhabung während des Transports identisch wie bei einem herkömmlichen Kraftstoff auf Mineralölbasis. Siehe Wulf und Kaltschmitt (2018), S. 6.

Lebensdauer eines mit grünem Wasserstoff betriebenen FCEV eine Spanne von **0,91 bis 2,82 t CO₂** (siehe **Abbildung 18**). Dies entspricht bis zu 7,8 % der gesamten CO₂-Emissionen eines FCEV.

- Die CO₂-Emissionen von **Wasserstofftankstellen** basieren auf einer Schätzung von Wulf und Kaltschmitt (2018) und **beinhalten auch den Transport sowie die Transportvorbereitung**. In Deutschland liegen die Mindest- bzw. Höchstwerte bei 1,21 kg und 2,46 kg CO₂/kg H₂. Unter Annahme eines Verbrauchs von 1.260 kg H₂ über die Lebensdauer eines Mittelklassewagens²⁴ und einer bereits bestehenden Infrastruktur von 40 % im besten und 20 % im schlechtesten Fall ergibt sich bei einem mit grauem Wasserstoff betriebenen FCEV eine geschätzte Spanne von **0,91–2,48 t CO₂/Lebensdauer** für Infrastrukturemissionen.
- Bei grünem Wasserstoff ist gegebenenfalls ein Ausbau des **Stromnetzes** erforderlich. Dies ist abhängig davon, wo sich die Umwandlungsanlagen befinden, d. h. ob die Anlagen in der Nähe der erneuerbaren Energiequellen liegen. Im ersten Fall kann davon ausgegangen werden, dass die damit verbundenen CO₂-Emissionen nahe Null liegen. Im zweiten Fall werden die zusätzlichen netzbezogenen Emissionen auf **0,34 t CO₂-Äq/Lebensdauer**²⁵ geschätzt.

Schließlich kann davon ausgegangen werden, dass die Infrastruktur für **fossil betriebene ICEVs** bereits

vorhanden ist, was **keine zusätzlichen Emissionen bedeutet**²⁶. Im Gegensatz dazu kann bei **mit E-Kraftstoffen betriebenen ICEVs** ein Ausbau des Stromnetzes erforderlich sein. Ähnlich wie bei FCEVs mit grünem H₂ hängt dies vom Standort der Umwandlungsanlage ab. Falls die Power-to-Liquid-Anlagen in der Nähe der erneuerbaren Energiequellen liegen, wäre kein zusätzlicher Ausbau des Stromnetzes erforderlich. In diesem Fall würden demnach keine zusätzlichen netzbedingten Emissionen anfallen. Gleiches gilt, wenn E-Kraftstoffe vollständig über die bereits bestehende Infrastruktur für den Transport flüssiger Stoffe importiert werden können. Unseren Schätzungen zufolge liegt der **Höchstwert** der netzbedingten CO₂-Emissionen bei ca. **0,43 t CO₂/Lebensdauer**²⁷, wie in **Abbildung 18 dargestellt**. Dies entspricht **4,7 %** der gesamten CO₂-Emissionen für ein mit E-Kraftstoffen betriebenes ICEV.

Anhand der zitierten Literatur wird deutlich, dass diese sehr groben Berechnungen jeweils nur auf einer oder wenigen Quellen basieren. Dies wirft **schwerwiegende Fragen hinsichtlich der Aussagekraft** auf. Die Emissionen aus der Bereitstellung von Infrastruktur sind daher ein Bereich, der weitere Forschungsarbeit erfordert. Dies ist vor allem insofern wichtig, als die oben stehenden Überschlagsberechnungen nahe legen, dass die CO₂-Emissionen aus der Energieinfrastruktur nicht unerheblich sind und folglich nicht vernachlässigt werden sollten.

24 Dieser Wert basiert auf einem Verbrauch von 0,0084 kg H₂/km für einen Hyundai Nexso (siehe z. B. <https://www.hyundai.de/modelle/nexo/>, abgerufen am 17.01.2020) und einer Gesamtleistung von 150.000 km.

25 Dies setzt einen Wirkungsgrad der Elektrolyseure von 70 % (vgl. Frontier Economics 2018, S. 64), einen Verbrauch von 1.260 kg H₂/Lebensdauer (vgl. Fußnote 24) und die Tatsache voraus, dass im Vergleich zu einem BEV nur 40 % der Netzinfrastruktur aufgebaut werden müssen. Darüber hinaus werden die CO₂-Emissionen ähnlich wie bei BEV pro MWh um 50 % reduziert.

26 Es kann zwar notwendig sein, Investitionen zu ersetzen, aber wie bei anderen Technologien lassen wir jeglichen Bedarf an Re-Investitionen in die bestehende Infrastruktur außer Acht.

27 Zur Berechnung dieses Werts nehmen wir zunächst für die Power-to-Liquid-Umwandlung einen Wirkungsgrad von 55 % an, da der angenommene Wirkungsgrad eines Elektrolyseurs von 70 % in Kombination mit einem Wirkungsgrad von 79,9 % für die Umwandlung von Wasserstoff in einen flüssigen Brennstoff (siehe Fashihi und Breyer (2017)) zu einem Wirkungsgrad von ca. 55 % für die gesamte Umwandlung von Elektrizität in einen flüssigen Brennstoff führt. Zweitens gehen wir im Vergleich zum BEV, wo das Stromnetz die gesamte Strecke zwischen Produktions- und Verbrauchsstandort abdecken muss, davon aus, dass das Netz nur 20 % der Strecke abdecken muss – auch aufgrund höherer Importe von E-Kraftstoffen. Dieser Wert ist niedriger als bei einem FCEV, der mit grünem H₂ betrieben wird, da angenommen wird, dass aufgrund der geringeren Effizienz einer Power-to-Liquid-Einheit (im Vergleich zu einem reinen Elektrolyseur) die nivellierten Stromkosten wichtiger sind und E-Kraftstoffe daher eher importiert werden. Abschließend reduzieren wir noch einmal die CO₂-Emissionen pro MWh um 50 %.

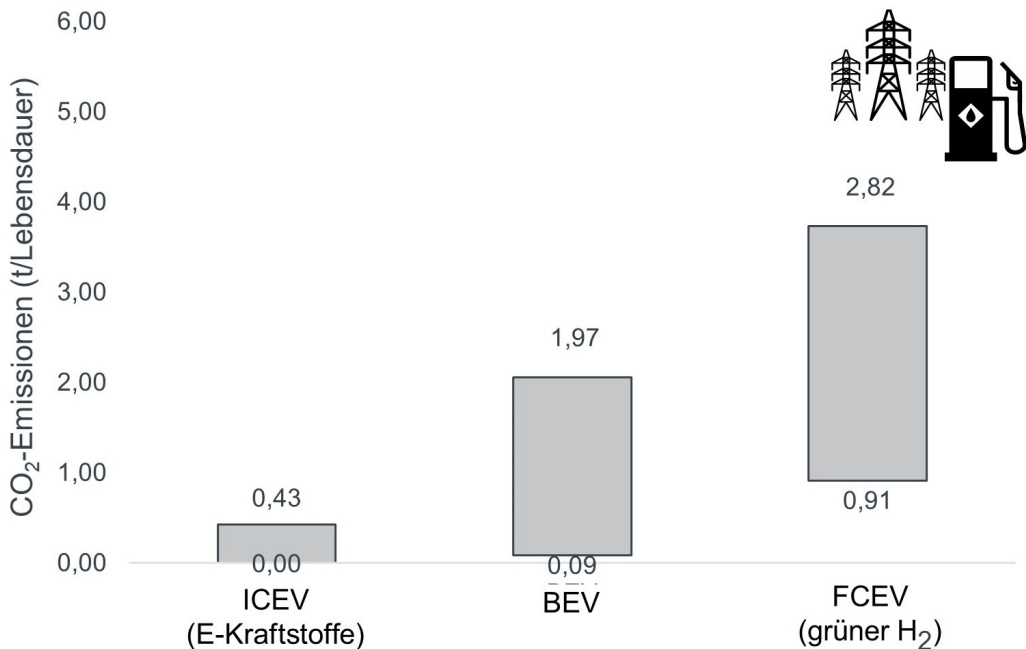


Abbildung 18: Infrastrukturemissionen werden nur selten analysiert, sind aber möglicherweise relevant

»Zu den Emissionen am Ende der Lebensdauer liegen bislang keine gesicherten Erkenntnisse vor.«

Zu den Emissionen in der End-of-Life-Phase (d. h. beim Recycling oder der Verschrottung des Fahrzeugs) liegen nach wie vor keine gesicherten Erkenntnisse vor. Nur wenige Studien befassen sich mit den End-of-Life-Emissionen, insbesondere bei FCEVs.

Trotz der Unsicherheit lassen sich aus **Abbildung 19** zwei wichtige Erkenntnisse ableiten:

- Erstens fallen die Emissionen am Ende des Lebenszyklus im Vergleich zu den anderen Phasen gering aus. Die Mittelwerte liegen unseren Schätzungen zufolge bei -0,82 und 0,43 t CO₂-Äq/Lebensdauer. Einige Studien geben sogar negative Emissionen an, insbesondere bei dieselbetriebenen ICEVs, BEVs und FCEVs. Negative Emissionen können auftreten, wenn ein Recycling sowie eine Weiterverwertung der Fahrzeug-
- komponenten in anderen Anwendungsfällen möglich ist und CO₂-intensive Rohstoffe ersetzt werden können. Batterien könnten potenziell als stationäre Kurzzeitspeicher genutzt werden, z. B. in Gebäuden („Second Life“). Aufgrund fehlender Erfahrungswerte und einer zu kleinen empirischen Datenbasis über Batterien ergibt sich allerdings eine hohe Unsicherheit. Auch müssten im Hinblick auf die negativen Emissionen kontrafaktische Sachverhalte (z. B. die Verwendung neuer statt recycelter Batterien) weiter untersucht werden.
- Zweitens sind die End-of-Life-Emissionen bei allen Fahrzeugtechnologien in der Regel recht ähnlich – mit Ausnahme der FCEVs, bei denen aufgrund unzureichender Daten keine fundierte Schlussfolgerung möglich ist.

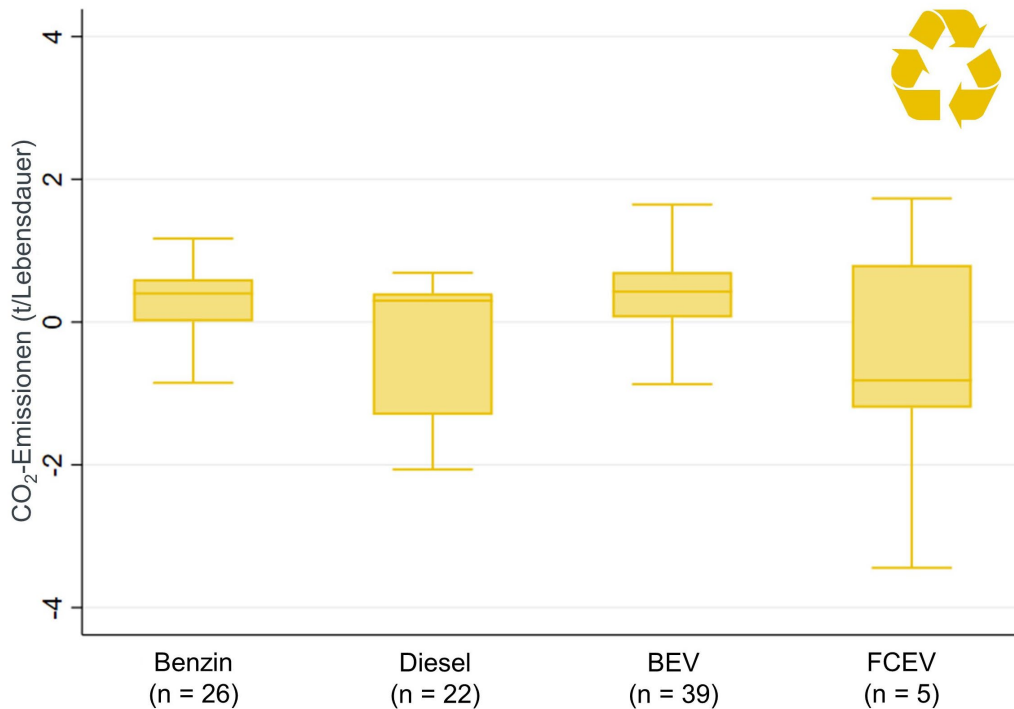


Abbildung 19: Hohe Unsicherheit bzgl. der Hauptfaktoren für End-of-Life-Emissionen

Anmerkung: CO₂-Emissionen werden in Tonnen pro Lebensdauer gemessen.

»Auswirkung: Aufgrund zu eng gefasster politischer Maßnahmen kann es zu einer Verzerrung einer ansonsten ausgewogenen Technologieauswahl kommen.«

In der vorstehenden Detailübersicht der Studienergebnisse zu den Emissionen über verschiedene Lebenszyklusphasen hinweg zeigen sich signifikante Unterschiede zwischen den Technologien hinsichtlich der Phase, in denen der größte Teil der Emissionen anfällt. Im Hinblick auf die Gesamtemissionen – unter Berücksichtigung der großen Bandbreite der Studienergebnisse – sind die Technologien aber durchaus vergleichbar.

Dies hat wichtige Auswirkungen auf die politische Gestaltung, wie bereits in Kapitel 2 dargelegt wurde: Wenn klimapolitische Maßnahmen nur bestimmte

Phasen des Lebenszyklus im Blick haben (wie z. B. Flottenziele, die sich nur auf Tank-to-Wheel-Emissionen konzentrieren), begünstigt dies unter Umständen Technologien, die in dieser spezifischen Lebenszyklusphase emissionsarm sind – selbst wenn ein Großteil der Emissionen dann an anderer Stelle anfällt. Die in diesem Kapitel dargelegten Ergebnisse zu den signifikanten Unterschieden zwischen den Technologien sprechen damit eher für einen umfassenden, lebenszyklusbasierten Politikansatz als für die derzeit vorherrschende sektorspezifische Herangehensweise.

»Die CO₂-Lebenszyklusemissionen hängen stark vom Einzelfall und den spezifischen Rahmenbedingungen ab.«

Eine weitere wichtige Schlussfolgerung unserer Metaanalyse ist, dass die Vorteile der verschiedenen Antriebstechnologien stark von der spezifischen Anwendung und den in den verschiedenen Studien zugrunde gelegten Rahmenbedingungen abhängen. Wir haben in diesem Zusammenhang bereits auf mehrere wesentliche Faktoren hingewiesen, z. B.

- Herstellungsort und -art der Fahrzeugkomponenten (hier spielt z. B. der bei der Produktion verwendete Strommix eine wichtige Rolle)
- Umstände der Fahrzeugnutzung, wie Fahrverhalten, Reichweitenanforderungen, erforderliche Lade-/Tankzeit usw.
- Annahmen zu Energiequellen (erneuerbar vs. fossil) und Infrastruktur (vorhanden oder noch zu bauen)
- verbleibende Unsicherheiten, durch die viele Parameter beeinflusst werden

Dies hat wichtige Auswirkungen auf die Anwendbarkeit der Lebenszyklusanalyse: Selbst mit einer verbesserten Datenbasis können sich technologische Entscheidungen nur begrenzt auf Lebenszyklusanalysen stützen. Angesichts der Vielzahl möglicher Anwendungsfälle und Rahmenbedingungen ist es höchst zweifelhaft, **dass bei einer zentralen Technologieentscheidung jemals** alle gegebenen Parameter und Einschränkungen berücksichtigt werden können, die für die CO₂-Emissionen in der Lebenszyklusanalyse ausschlaggebend sind. Mögliche politische Implikationen werden im folgenden Kapitel diskutiert.

Auch in Situationen, in denen ein Technologievergleich auf Grundlage einer Lebenszyklusanalyse nützlich sein könnte, muss durch Festlegung ähnlicher Annahmen für alle untersuchten Technologien ein möglichst „**fairer**“ Vergleich sichergestellt werden.

Die Gesamtemissionen von BEVs sinken beispielsweise, wenn der Anteil an erneuerbarem Lade-strom zunimmt. Gleichzeitig ebnen zusätzliche erneuerbare Energiequellen den Weg zur Herstellung CO₂-neutraler Kraftstoffe (E-Kraftstoffe). Angesichts des steigenden Anteils an erneuerbaren Energien sollte dementsprechend bei der Analyse von Verbrennungsmotoren ebenfalls von einem steigenden Beimischungsanteil von E-Kraftstoffen ausgegangen werden (ggf. auch von Hybridisierung).

Aus technologischer Sicht können alle Antriebstechnologien eine CO₂-neutrale Mobilität bieten!

Es sind weitere Forschungsarbeiten erforderlich, um fundiertere und zuverlässigere Ergebnisse sicherzustellen, die Aussagekraft der Parameter zu verbessern, Unsicherheiten zu verringern und um die festgestellten Lücken zu schließen (z. B. in Bezug auf die Energieinfrastruktur oder das Recycling).

Technologieoffene und zielorientierte Ansätze in der Klimapolitik sorgen für effektive CO₂-Einsparungen

Die wichtigsten Ergebnisse unserer Metaanalyse lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Klimapolitische Entscheidungen, die auf einzelne Technologien ausgerichtet sind, müssen auf einer umfassenden sektorübergreifenden, globalen und intertemporalen Lebenszyklusanalyse basieren, um eine nachhaltige Technologieauswahl sicherzustellen.
- Leider liegt eine solche umfassende Datenbasis bislang noch nicht vor.

- Die bereits vorliegenden Daten weisen darauf hin, dass es keine eindeutig überlegene Technologie gibt, sondern dass die relativen Vorteile von Antriebstechnologien vielmehr von ganz individuellen Umständen abhängen.

Dennoch muss sich die Klimapolitik jetzt den Herausforderungen stellen. Dementsprechend skizzieren wir in diesem Abschnitt die politischen Empfehlungen, die auf Basis der bislang vorliegenden Erkenntnisse formuliert werden können.

»Aufgrund der unvollständigen Datenlage ist ein zielgerichteter und technologie-neutraler Ansatz in der Politik erforderlich.«

Die zusammengefassten Ergebnisse unserer Metaanalyse stellen ein Grundsatzdilemma für die heutige Politikgestaltung dar. Für zentrale Entscheidungsträger werden die vorliegenden Informationen vermutlich nie ausreichen, um die optimale Technologie für einen universellen Anwendungsfall festzulegen. Dies hängt mit den folgenden Aspekten zusammen:

- Es fehlen noch immer wichtige Informationen – und es ist unwahrscheinlich, dass in absehbarer Zeit ein umfassender Datenbestand zur Verfügung stehen wird.
- Viele Parameter hängen vom individuellen Anwendungsfall ab und sind daher von Natur aus nicht geeignet für eine zentrale Entscheidungsfindung.

- Wir müssen davon ausgehen, dass sich das künftige Mobilitätsverhalten und weitere Rahmenbedingungen bei vielen Technologien im Laufe der Zeit ändern werden. Dementsprechend sind viele der anstehenden Entwicklungen heute noch nicht vorhersehbar.

Daher birgt jede technologiespezifische Entscheidung heute ein erhebliches Risiko, sich in Zukunft als falsch zu erweisen. Die wichtigste Empfehlung an die politischen Entscheidungsträger lautet daher, ein Mikromanagement einzelner Technologien so weit wie möglich zu vermeiden. Politische Instrumente sollten technologie-neutral gestaltet und die Marktkräfte genutzt werden, um effiziente Technologie-Mixe zur Senkung von CO₂-Emissionen zu

entwickeln – insbesondere im Hinblick auf den individuellen Mobilitätsbedarf und unsichere zukünftige Entwicklungen.

In diesem Zusammenhang bedeutet Technologieoffenheit, dass neben allen heute verfügbaren Technologien auch potenzielle künftige Entwicklungen und Innovationen dazu beitragen können, Emissionen zu senken und unter gleichen Wettbewerbsbedingungen zu konkurrieren. Politische Anreize sollten sich daher auf das übergeordnete Ziel der Reduzierung von CO₂-Emissionen konzentrieren. Sie sollten es den einzelnen Akteuren ermöglichen, unvoreingenommene und dezentrale Entscheidungen zu treffen.

Auf der Grundlage der Ergebnisse dieser Studie muss dabei sichergestellt werden, dass Anreize zur CO₂-Reduzierung Teil eines umfassenden Ansatzes sind und die Emissionen

- intertemporal und damit langfristig,
- über alle Sektoren hinweg und
- auf internationaler Ebene betrachtet werden.

Vor dem Hintergrund dieser Empfehlungen müssen die heutigen klimapolitischen Maßnahmen im Mobilitätssektor in Deutschland und Europa kritisch hin-

terfragt werden: Die aktuellen politischen Maßnahmen sind zu technologiespezifisch, stark sektoral ausgerichtet und wenig effizient. So sind z. B. die Anreize zur Emissionsminderung auf dem Well-to-Wheel-Pfad zwischen Well-to-Tank und Tank-to-Wheel aufgeteilt. Die Kraftstoffanbieter reagieren dabei auf die bevorstehende RED II-Verordnung, die unter Well-to-Tank fällt. Umgekehrt sind jedoch die OEMs die einzigen Akteure, die Anreize zur Reduzierung der Tank-to-Wheel-Emissionen erhalten, nämlich durch Flottenziele. Die getrennte Regulierung der beiden Lebenszyklusphasen führt zu zahlreichen Ineffizienzen. So sind die Marktteilnehmer derzeit beispielsweise gezwungen, die Emissionen innerhalb der abgesteckten Grenzen der jeweiligen Phase zu reduzieren. Bei einer Ausweitung des Geltungsbereichs der Well-to-Wheel-Regulierung hingegen könnte jedoch flexibler bestimmt werden, wie und an welcher Stelle Emissionsminderungen am kosteneffizientesten sind. Ebenso fragwürdig sind technologiespezifische Programme und Ziele, wie z. B. individuelle Ziele für Elektrofahrzeuge.

Im Zusammenhang mit den Ergebnissen unserer Metaanalyse sollten diese politischen Maßnahmen im Rahmen eines umfassenderen technologieneutralen Ansatzes kritisch hinterfragt und verbessert werden.

»Einmalige Fahrzeugemissionen in Verbindung mit einer langen Lebensdauer erfordern eine besondere Berücksichtigung der zeitlichen Dimension.«

Aus den Erkenntnissen lässt sich eine weitere politische Empfehlung ableiten:

- Der Klimaeffekt – und damit auch das Pariser Abkommen – folgt der Logik eines **CO₂-Gesamtbudgets**. Dies bedeutet, dass die Menge an kumulierten Emissionen relevant ist (und nicht rein die jährlichen Emissionen, siehe **Kapitel 2** Motivation und Herangehensweise).
- **Einmalige Emissionen** aus der Fahrzeugherstellung machen einen **erheblichen** Anteil an den Gesamtemissionen über die

gesamte Lebensdauer eines Fahrzeugs aus (siehe **Kapitel 3** Ergebnisse).

In der Kombination wird also deutlich, dass es bei einem politisch motivierten, voreiligen Austausch der bestehenden Flotten passieren kann, dass das festgelegte Budget an zulässigen Emissionen unbeabsichtigt aufgrund von erheblichen einmaligen Emissionen bereits frühzeitig aufgebraucht wird. Stattdessen deuten die beiden genannten Erkenntnisse auf eine wichtige dynamische Schlussfolgerung hin – nämlich, dass der Zeitpunkt der politischen Maßnahmen entscheidend ist und

nicht immer gilt: je schneller die politische Umsetzung, desto besser.

Das Prinzip eines Gesamtbudgets für klimarelevante Emissionen impliziert, dass eine frühe politische Umsetzung nicht immer besser ist.

Um die Klimaschutzziele effizient zu erreichen, wird es stattdessen notwendig sein, alle verfügbaren Optionen zur Verringerung der CO₂-Emissionen zu nutzen und den jeweiligen Gesamtnettoeffekt auf die Emissionseinsparungen zu berücksichtigen. Dabei gilt es, alle Emissionen zu berücksichtigen, unabhängig davon, in welchem Sektor, in welcher Region oder zu welchem Zeitpunkt sie ausgestoßen werden. Dies impliziert (auch wenn dies oft vernachlässigt wird), dass einmaligen Emissionen aus dem Industriesektor größere Aufmerksamkeit geschenkt werden sollte, da diese in der Regel hoch ausfallen.

- Durch die Konzentration auf sektorspezifische Ziele – insbesondere auf den Straßenverkehr und damit auf die Emissionen aus der Fahrzeugnutzung – kann es unter Umständen vorteilhaft erscheinen, die Flotte so schnell wie möglich auszutauschen. Angesichts der Konzentration der Flottenziele auf Tailpipe-Emissionen könnte eine Schlussfolgerung darin bestehen, verstärkt Maßnahmen für einen schnellen Austausch der Fahrzeugflotte zu ergreifen, während dabei andere potenzielle Wege zur Senkung der CO₂-Emissionen in der bestehenden Flotte unberücksichtigt bleiben.
- Einmalige Emissionen des Fahrzeugbaus haben jedoch einen unwiderruflichen Einfluss auf das verbleibende CO₂-Budget. Um

das Ziel einer Begrenzung des maximalen globalen Temperaturanstiegs auf 1,5 bzw. 2°C zu erreichen, darf nur noch ein begrenztes Restbudget an Treibhausgasen in die Atmosphäre ausgestoßen werden. Laut Schätzungen des IPCC verbleibt ein Budget von 420 bis 580 Gt CO₂-Äq, um das 1,5°C-Ziel mit einer Wahrscheinlichkeit von 50 bis 66 % zu erreichen²⁸. Folglich ist im Hinblick auf CO₂-Emissionen eine kumulative Analyse erforderlich, die unabhängig davon ist, wann die Emissionen entstehen.

Bei einem übereilten Austausch von Fahrzeugflotten kann es aufgrund von erheblichen einmaligen Emissionen dazu kommen, dass ein Großteil des verbleibenden Budgets schnell aufgebraucht wird. Dementsprechend könnte ein überstürzter Technologiewechsel die Bemühungen zur Senkung der kumulierten CO₂-Emissionen im Laufe der Zeit behindern: Aufgrund hoher einmaliger Emissionen, die in einer ähnlichen Größenordnung liegen wie die Gesamtemissionen während des Fahrzeugbetriebs, könnte ein vorzeitiger Austausch der Flotte sogar zu einer vorzeitigen Ausschöpfung des Restbudgets führen.

Dies wird in **Abbildung 20** anhand einer groben Schätzung für das 2030-Ziel der Bundesregierung für den Verkehrssektor veranschaulicht:

- Das Ziel der Bundesregierung, die CO₂-Emissionen im Verkehrssektor bis 2030 um 40 % zu reduzieren, entspricht bei Annahme eines linearen Pfades rund 400 Mio. t CO₂-Äq im Zeitraum von 2018 bis 2030²⁹. Geht man davon aus, dass ca. 60 % der CO₂-Emissionen im deutschen Verkehrssektor durch Pkw verursacht werden, ergibt sich ein kumulatives Einsparziel für Pkw von ca. 240 Mio. t CO₂-Äq bis 2030.

²⁸ Siehe IPCC (2018), S. 14.

²⁹ Der Wert von 400 Mio. t CO₂-Äq. wurde berechnet, indem die Differenz der Gesamtemissionen zwischen 2030 (angestrebte Reduzierung auf 95 Mio. t CO₂-Äq.) und 2018 (Ist-Emissionen von 162 Mio. t CO₂-Äq.) mit 12 Jahren multipliziert und das Ergebnis durch zwei geteilt wurde.

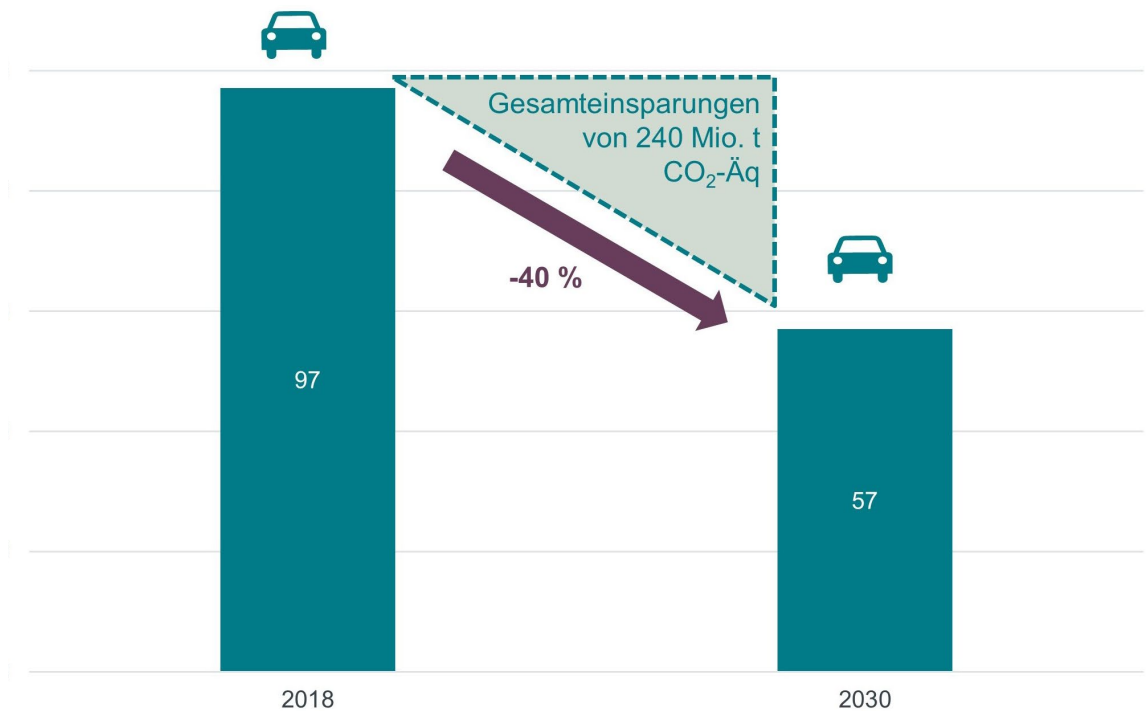


Abbildung 20: Im Verkehrssektor bleibt nur noch ein sehr geringes CO₂-Budget, um die Zwischenziele für 2030 zu erreichen

- Diese CO₂-Menge entspricht in etwa dem, was die insgesamt ca. 47 Mio. Autos auf deutschen Straßen aktuell ausstoßen³⁰. Mit anderen Worten: Wenn es theoretisch möglich wäre, die Lebensdauer der heutigen Autos zu verdoppeln und damit eine Fahrzeuggeneration ohne weitere Änderungen der Mobilitätsmuster oder Kraftstoffe zu überspringen, lägen die Nettoeinsparungen auf einem ähnlichen Niveau.
- Im Gegensatz dazu können politische Maßnahmen zur Reduzierung der Emissionen unter Umständen einen vorzeitigen (teilweisen) Austausch der Flotte auslösen und auf diese Weise schnell einen erheblichen Teil der Nettoeinsparungen aufwiegen.

Dementsprechend könnte es bei zusätzlichen CO₂-Emissionen sinnvoll sein, die bestehende Flotte langsamer auszutauschen, anstatt einen überstürzten Technologieaustausch zu fördern. Die Einsparungen, die durch neue und effizientere Fahrzeuge erzielt werden, rechtfertigen zu einem späteren Zeitpunkt umgekehrt den Austausch der bestehenden Flotte, trotz der zusätzlichen einmaligen Emissionen durch neue Fahrzeuge.

Eine effiziente Klimapolitik sollte daher sicherstellen, dass bei einem Technologieaustausch ein zeitlich optimaler Ansatz verfolgt wird, z. B. in Koordination mit dem regulären Reinvestitionszyklus.

30 Siehe Kraftfahrt-Bundesamt, https://www.kba.de/DE/Statistik/Fahrzeuge/Bestand/bestand_node.html, abgerufen am 11.10.2019.

»Sektorbezogene Ziele begünstigen eher eine Verlagerung von Emissionen statt eine Reduzierung.«

Klimapolitische Maßnahmen sind oft auf einen bestimmten Sektor begrenzt. So konzentrieren sich die Flottenziele der EU auf die Emissionen während der Fahrzeugnutzung und damit auf den Verkehrssektor. Dagegen werden Emissionen im Energie- und Industriesektor, die durch Fahrzeugherstellung oder Kraftstoffproduktion entstehen, nicht in verkehrsspezifischen Maßnahmen berücksichtigt, sondern den anderen Sektoren überlassen. Aus diesem Grund ist eine solche sektorspezifische Fokussierung in vielen Fällen nicht der effizienteste Ansatz zur Lösung des Emissionsproblems, da Emissionen lediglich in andere Sektoren verschoben werden.

Das lässt sich anhand einer einfachen Beispielrechnung für das politische Ziel veranschaulichen, bis 2030 bis zu 10,5 Mio. BEVs auf deutsche Straßen zu bringen.³¹

Das im Klimapaket der Bundesregierung³² gesteckte Ziel sieht bis zum Jahr 2030 zwischen 7 Mio. und 10 Mio. BEVs vor. Dieses Ziel basiert hauptsächlich auf NPM AG 1 (2019), S. 21. Hier wird geschätzt, dass die CO₂-Emissionen bis 2030 jährlich um 13 Mio. t CO₂³³ im Vergleich zum Referenzszenario gesenkt werden können, wenn bis dahin 10,5 Mio. ICEVs durch BEVs ersetzt würden. Das wären 6,5 Mio. mehr Elektrofahrzeuge als im Referenzszenario. Diese Schätzung ist plausibel für Emissionen, die dem Fahrzeug direkt zugerechnet werden können, d. h. Tailpipe/Tank-to-Wheel. Wenn wir jedoch

die Perspektive erweitern und auch die anderen Sektoren und kumulativen Effekte betrachten, die sich aus der vorliegenden Metaanalyse ergeben, wird deutlich, dass die Senkung der globalen Emissionen durch diese politische Maßnahme weit- aus niedriger ausfällt.

Abbildung 21 zeigt, dass der Großteil der für den Verkehrssektor ausgewiesenen Emissionssenkungen keine echte Senkung, sondern oftmals nur eine Verschiebung in andere Sektoren darstellt. So werden sich die tatsächlichen Emissionssenkungen bis 2030 auf lediglich 6 % belaufen, während der Großteil der Emissionen in andere Sektoren oder Regionen verschoben wird – mit ungewissen Auswirkungen im Hinblick auf die Senkung der Gesamtemissionen.

- Die Überschlagsberechnung basiert zunächst auf der Schätzung aus NPM AG 1 von **Emissionseinsparungen in Höhe von 13 Mio. t CO₂** in der Tank-to-Wheel-Phase bis 2030³⁴. Anschließend wird die jährliche Perspektive auf eine kumulative Perspektive erweitert: 13 Mio. t CO₂ Emissionen für das Einzeljahr 2030 entsprechen kumulierten Tank-to-Wheel-Emissionen³⁵ von **65 Mio. t CO₂** im Zeitraum von 2020 bis 2030. Das basiert auf der Annahme eines linearen Austauschs der zusätzlichen 6,5 Mio. ICEVs durch BEVs zwischen 2020 und 2030³⁶.

31 BMU (2019), S. 6.

32 Bundesregierung (2019), S. 76.

33 NPM AG 1 (2019), S. 21. Die CO₂-Einsparungen in Höhe von 13 Mio. t entsprechen dem Delta zwischen einer Flotte mit 6,5 Mio. ICEVs und einer Flotte mit 6,5 Mio. BEVs.

34 Die unten stehenden Zahlen beruhen auf folgenden Annahmen: Jährliche Fahrleistung: 16.000 km, Gesamtleistung: 150.000 km, jährliche Well-to-Tank-Emissionen eines BEV: 1,58t CO₂ – abgeleitet aus einem Verbrauch von 22,4 kWh/100 km (WLTP für Kompaktfahrzeug plus 10 % Verluste für Laden und Klimaanlage) und einer CO₂-Intensität des Strommixes bis 2026 von 437 g/kWh (inkl. 42 g/kWh EE-Anlagen, Prognose der Internationalen Energieagentur IEA 2018).

35 Alternativ können Emissionseinsparungen auch in g CO₂/km statt in Mio. t CO₂ ausgedrückt werden. Dies ist in den Werten der linken Spalte von Abb. 21 dargestellt. Für die Tank-to-Wheel-Phase bedeutet dies beispielsweise, dass jährliche Emissionseinsparungen von 13 Mio. t CO₂ einer Reduzierung von 124 g CO₂/km entsprechen.

- Anschließend untersuchen wir die übrigen Phasen des Lebenszyklus – d. h. alle Emissionen, die nicht in der Tank-to-Wheel-Phase anfallen. Die jeweiligen Auswirkungen der Einführung von 6,5 Mio. BEVs auf die Emissionen werden dabei auf Grundlage der Erkenntnisse aus der vorliegenden Metaanalyse geschätzt:
 - Weitere Emissionseinsparungen von **8,8 Mio. t CO₂** in der Well-to-Tank-Phase bei ICEVs: Bis 2030 können 8,8 Mio. t CO₂ in der Kraftstoffherstellung im globalen Energiesektor eingespart werden, weil kein Benzin oder Diesel für ICEV mehr hergestellt werden muss.³⁷
 - Jedoch werden in der Well-to-Tank-Phase von BEVs zusätzliche kumulative Emissionen in Höhe von 51,5 Mio. t CO₂ in den Energiesektor verschoben, da der Strommix in Deutschland bis 2030 nicht CO₂-neutral sein wird.³⁸
 - Darüber hinaus entstehen zusätzliche Emissionen durch den Ausbau der Infrastruktur: Wie in **Kapitel 3 Ergebnisse** dargestellt, fehlt es noch an einer belastbaren Datenbasis zu infrastrukturbeding-
- ten Emissionen. Basierend auf unserer annähernden Schätzung beziffern wir die zusätzlichen infrastrukturbezogenen Emissionen bis 2030 auf ca. **3,6 Mio. t CO₂**.³⁹ Hierbei handelt es sich um eine konservative Schätzung, da wir von einer „Abschreibung“ der Emissionen über der Lebensdauer der Infrastruktur von 40 bis 100 Jahren ausgehen. Da die Emissionen jedoch tatsächlich während des Aufbaus der Infrastruktur anfallen, praktisch gesehen also vorgezogen entstehen, ergibt sich daraus eine höhere Emissionslast im Zeitraum bis 2030.
- Zuletzt könnten im Industriesektor bei der Herstellung und beim Recycling von BEVs im Vergleich zu ICEVs zusätzliche CO₂-Emissionen in Höhe von **14,8 Mio. t CO₂** anfallen.⁴⁰ Auch dieser Wert ist eher konservativ, da es sich nur um einen anteiligen Wert bei einer angenommenen Gesamtleistung von 150.000 km handelt.⁴¹ Außerdem wird hierbei das Risiko eines vorzeitigen Austauschs von 6,5 Mio. Fahrzeugen nicht berücksichtigt.⁴²

36 Da in vielen der untersuchten Studien nur die Well-to-Wheel-Emissionen und nicht die Well-to-Tank- bzw. Tank-to-Wheel-Emissionen angegeben werden, wird das Ergebnis unserer Metaanalyse ebenfalls in Gesamtwerten für die Well-to-Wheel-Phase ausgedrückt. Gemäß den in **Kapitel 3** dargestellten Ergebnissen müssen wir daher für die Analyse von einer plausiblen Aufteilung auf die Lebenszyklusphasen ausgehen. Für die jährlichen Tank-to-Wheel-Emissionen wird ein Wert von 0 t CO₂ (BEV) und 2 t CO₂ (ICEV, basierend auf einem Verbrauch von 5,6 l/100 km, Kompakt-Pkw, WLTP) angenommen. Dementsprechend werden mit 6,5 Mio. BEVs (die zwischen 2021 und 2030 ICEVs linear ersetzen) insgesamt 65 Mio. t CO₂ eingespart.

37 Bei den jährlichen Well-to-Tank-Emissionen gehen wir von 0,27 t CO₂ aus (ICEV, basierend auf einem Verbrauch von 5,6 l/100 km, Kompakt-Pkw, WLTP).

38 Die Schätzung basiert auf der Prognose der Internationalen Energieagentur für die durchschnittliche Emissionsintensität des Strommixes in Deutschland im Jahr 2026 (einschl. des ökologischen Rucksacks) von 437 g/kWh. Während die Gesamtemissionen im Energiesektor durch den EU-Emissionshandel gedeckelt sind, müssen für eine umfassende Bewertung von kleineren Änderungen im Stromverbrauch auch die Auslagerungseffekte berücksichtigt werden (z. B. Auslagerung der Nachfrage außerhalb des EU-Emissionshandels).

39 Wir gehen von Infrastrukturemissionen von 1,03 t CO₂ (BEV) und 0 t CO₂ (ICEV mit Dieselmotor) über den gesamten Lebenszyklus aus.

40 Die Emissionen bei der Herstellung werden auf 9,90 t CO₂ (BEV) und 5,80 t CO₂ (ICEV) und die End-of-Life-Emissionen auf 0,43 t CO₂ (BEV) sowie 0,30 t CO₂ (ICEV) geschätzt. Jedem Jahr im Lebenszyklus des Fahrzeugs wird dabei ein identischer Anteil zugeordnet. Da bei einer linearen Markteinführung der BEVs zwischen 2021 und 2030 die durchschnittliche Inbetriebnahme der BEVs im Jahr 2026 liegt und die kumulierten Emissionen am Jahresende 2030 gemessen werden, enthält unsere Berechnung die ersten 5 Jahre der durchschnittlichen Herstellungs- und End-of-Life-Emissionen der Fahrzeuge, was einem anteilmäßigen Wert von 53% entspricht (16,00 km * 5 Jahre / 150.000 km Gesamtleistung).

41 Werden anstelle der anteiligen Werte aus der Herstellung von 6,5 Mio. BEVs als Ersatz für 6,5 Mio. ICEVs die Gesamtemissionen zugrunde gelegt, würden sich die Emissionen auf 27,5 Mio. t CO₂ belaufen.

42 Unter der Annahme, dass Fahrzeugbesitzer ihre ICEVs aufgrund von politischen Anreizen schon vor dem Ende der Lebensdauer durch BEVs ersetzen, steigt der Umfang der einmaligen Emissionen aufgrund dieser „Sonderabschreibung“ noch weiter.

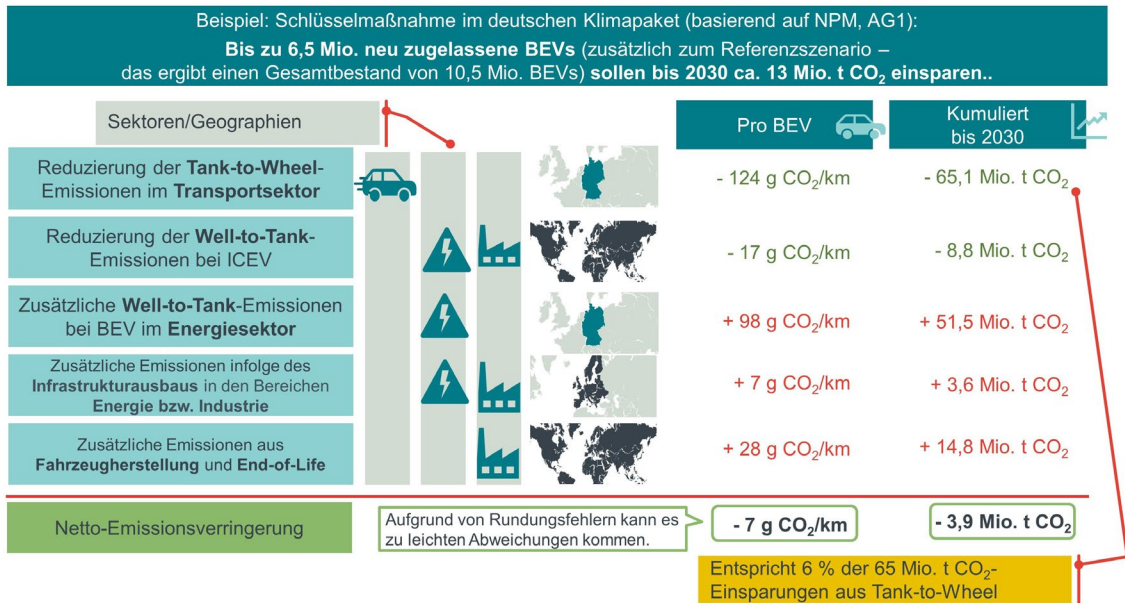


Abbildung 21: Deutschlands Ziel, die Verkehrsemissionen durch die Einführung von bis zu 10,5 Mio. BEVs zu reduzieren, führt hauptsächlich zu einer Verlagerung der Emissionen in den Energie- und Industriesektor

Anmerkung: Betroffene Sektoren/Symbole: Auto = Verkehrssektor, Blitz-in-Dreieck = Energiesektor, Fabrik = Industriesektor. Die kumulierten Werte basieren auf einer linearen Markteinführung zusätzlicher 6,5 Mio. BEVs, d. h. ab 2021 werden jedes Jahr 0,65 Mio. ICEVs durch BEVs ersetzt. Bis 2030 wären dann alle zusätzlichen 6,5 Mio. BEVs auf den Straßen unterwegs.

Legt man diesen Berechnungen Annahmen zu Lebenszyklusemissionen zugrunde, könnte die zusätzliche Umstellung auf 6,5 Mio. BEVs bis 2030 zunächst nur eine kumulierte Nettoerduktion von 3,9 Mio. t CO₂ liefern, etwa 6% der angegebenen 65 Mio. t CO₂ Reduktionen im Verkehrssektor. Der weitaus größte Anteil der vermeintlichen Emissionssenkungen wird stattdessen in andere Sektoren oder Regionen verschoben, weshalb die Netto-Auswirkungen auf die Emissionen weitaus weniger eindeutig sind.

Insgesamt zeigt dieses einfache Beispiel, wie wichtig eine Betrachtung des gesamten Lebenszyklus ist, wenn es um die Erarbeitung politischer Maßnahmen für einen wirksamen, globalen Klimaschutz geht.

»Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass stets das Gesamtbild betrachtet und ein neutraler Technologieansatz verfolgt werden muss.«

Die vorliegende Analyse veranschaulicht die Bedeutung eines umfassenden – d. h. sektorübergreifenden, globalen und intertemporalen – Ansatzes zur Erreichung des Klimaziels von 1,5 bzw. 2°C.

- Mit einem **sektorübergreifenden Ansatz** wird sichergestellt, dass Gesamtemissionen über alle Sektoren hinweg reduziert werden – und nicht nur von einem Sektor in den anderen verschoben werden oder möglicherweise sogar insgesamt ansteigen.
- Hierbei gilt es, einen **globalen** Ansatz zu entwickeln, denn für den Treibhauseffekt ist es unerheblich, an welchem Ort die Emissionen anfallen.
- Ein **intertemporaler Ansatz** bedeutet, dass alle Emissionen unabhängig von ihrem Entstehungszeitpunkt berücksichtigt werden müssen, da aufgrund des Restbudgets nur noch eine bestimmte Menge Treibhausgase weltweit ausgestoßen werden darf, wenn das Klimaziel erreicht werden soll.

In der Klimapolitik gilt es also, den Blick auf das große Ganze zu wahren: Politische Ansätze müssen sektorübergreifend statt sektorspezifisch sowie global statt national ausgelegt sein und sie müssen alle Schritte der Wertschöpfungskette berücksichti-

gen (d. h. auch die Emissionen aus der Herstellung von Fahrzeugen und Antriebsenergie).

Außerdem lässt sich festhalten, dass trotz der zahlreichen bereits vorhandenen Studien und Analysen immer noch wichtige Informationen für eine umfassende Lebenszyklusanalyse fehlen, z. B. für die Phase „Infrastruktur“ oder zu relevanten Antriebstechnologien (z. B. FCEVs oder Antriebstechnologien mit E-Kraftstoffen). Zudem hängen die Gesamt-CO₂-Emissionen stark vom Einzelfall und den spezifischen Rahmenbedingungen ab.

Als positives Ergebnis lässt sich feststellen, dass keine der verfügbaren Technologien eindeutig überlegen ist. Vielmehr fallen die CO₂-Emissionen bei allen Technologien ähnlich aus und eröffnen langfristig die Aussicht auf eine praktisch CO₂-neutrale Mobilität. Das ebnet den Weg für Technologieentscheidungen, die im Idealfall mit einem technologieneutralen politischen Ansatz gefördert werden sollten. Auf diese Weise können Endnutzer die Vor- und Nachteile der jeweiligen Antriebstechnologien bezogen auf den spezifischen Anwendungsfall abwägen – ohne dabei Abstriche im Hinblick auf den Klimaschutz machen zu müssen.

Literatur

Zitierte Literatur

[AGEB 2019] Auswertungstabellen zur Energiebilanz Deutschland, Daten für die Jahre von 1990 bis 2018, Stand: August 2019.

[Amponsah et al. 2014] GHG emissions from renewable energy sources: A review of lifecycle considerations, in: *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 39, S. 461-475.

[Arvesen et al. 2015] Life cycle assessment of transport of electricity via different voltage levels: A case study for Nord-Trøndelag county in Norway, in: *Applied Energy*, Vol. 157, S. 144-151.

[Bauer et al. 2015] The environmental performance of current and future passenger vehicles: Life cycle assessment based on a novel scenario analysis framework, in: *Applied Energy*, Vol. 157, S. 871-883.

[BMU 2019] Eckpunkte für das Klimaschutzprogramm 2030, Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit, September 2019.

[BMVI 2019] Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (Hrsg.), *Verkehr in Zahlen 2018/2019*.

[Bundesregierung 2019] Klimaschutzprogramm 2030 der Bundesregierung zur Umsetzung des Klimaschutzplans 2050, Die Bundesregierung, Oktober 2019.

[Bünger et al. 2019] Infrastrukturbedarf E-Mobilität, Studie im Auftrag der ADAC Stiftung.

[Chuang et al. 2018] The relationship between electricity emission factor and renewable energy certificate: The free rider and outsider effect, in: *Sustainable Environment Research*, Vol. 28, S. 422-429.

[Denholm und Kulcinski 2003] Net energy balance and greenhouse gas emissions from renewable energy storage systems, Report 223-1, Energy Center of Wisconsin.

[Evangelisti et al. 2017] Life cycle assessment of a polymer electrolyte membrane fuel cell system for passenger vehicles, in: *Journal of Cleaner Production*, Vol. 142, S. 4339-4355.

[Fasihi und Breyer 2017] Synthetic Methanol and Dimethyl Ether Production based on Hybrid PV-Wind Power Plants, 11. Internationale Konferenz zur Speicherung Erneuerbarer Energien, 14.-16. März 2017, Düsseldorf.

[FGH 2018] Metastudie Forschungsüberblick Netzintegration Elektromobilität, Forschungsgemeinschaft für elektrische Anlagen und Stromwirtschaft e.V. (FGH), Bericht im Auftrag von VDEIFNN und BDEW, Dezember 2018.

[Frontier Economics 2018] Agora Verkehrswende and Agora Energiewende (2018), Die zukünftigen Kosten strombasierter synthetischer Brennstoffe.

[Harrison et al. 2010] Life cycle assessment of the transmission network in Great Britain, in: *Energy Policy*, Vol. 38, Nr. 7, S. 3622-3631.

[IPCC 2014] Climate Change 2014 – Mitigation of Climate Change, Beitrag der Arbeitsgruppe III zum fünften Sachstandsbericht des Weltklimarats (IPCC).

[IPCC 2018] Sonderbericht – 1,5°C globale Erwärmung.

[Jorge und Hertwich 2013] Environmental evaluation of power transmission in Norway, in: *Applied Energy*, Vol. 101, S. 513-520.

[Kadiyala, Kommalapati und Huque 2017] Characterization of the life cycle greenhouse gas emissions from wind electricity generation systems, in: *International Journal of Energy and Environmental Engineering*, Vol. 8, S. 55-64.

[Kommalapati et al. 2017] Review of the Life Cycle Greenhouse Gas Emissions from Different PV and CSP Electricity Generation Systems, in: *Energies*, Vol. 10, S. 1-18.

[Lucas, Silva und Neto 2012] Life-cycle analysis of energy supply infrastructure for conventional and electric vehicles, in: *Energy Policy*, Vol. 41, S. 537-547.

[Madrigal und Spalding-Fecher 2010] Impacts of Transmission and Distribution Projects on Greenhouse Gas Emissions – Review of Methodologies and a Proposed Approach in the Context of World Bank Lending Operations, Diskussionspapier Nr. 21 des Ausschusses für den Sektor Energie und Bergbau, November 2010.

[Mostert et al. 2018] Comparing Electrical Energy Storage Technologies Regarding Their Material and Carbon Footprint, in: *Energies*, Vol. 11, S. 1-25.

[Navigant, Kompetenzzentrum Elektromobilität and RE-xpertise 2019] Verteilnetzausbau für die Energiewende – Elektromobilität im Fokus, Bericht für Agora Verkehrswende, Agora Energiewende und The Regulatory Assistance Project (RAP), August 2019.

[NPM AG 1 2019] Wege zur Erreichung der Klimaziele 2030 im Verkehrssektor, Zwischenbericht 03/2019.

[Nugent und Sovacool 2014] Assessing the lifecycle greenhouse gas emissions from solar PV and wind energy: A critical meta-survey, in: Energy Policy, Vol. 65, S. 229-244.

[Robinius et al. 2018] Comparative Analysis of Infrastructures: Hydrogen Fueling and Electric Charging of Vehicles, Bericht im Auftrag von H₂ Mobility.

[Simons und Bauer 2015] A life-cycle perspective on automotive fuel cells, in: Applied Energy, Vol. 157, S. 884-896.

[Statistisches Bundesamt 2019] Umweltökonomische Gesamtrechnung, Transportleistungen und Energieverbrauch im Straßenverkehr 2007 – 2017.

[Turconi et al. 2014] Life cycle assessment of the Danish electricity distribution network, in: The International Journal of Life Cycle Assessment, Vol. 19, Nr. 1, S. 100-108.

[UNITI Berechnungstool 2019] UNITI Berechnungstool Lebenszyklusemissionen, Frontier Economics.

[Wulf und Kaltschmitt 2018] Hydrogen Supply Chains for Mobility – Environmental and Economic Assessment, in: Sustainability, Vol. 10, Nr. 6, S. 1-26.

In der vorliegenden Metaanalyse berücksichtigte Lebenszyklusanalysen

[ADAC 2018] PRIMA FÜRS KLIMA?, Die Ökobilanz der Antriebe (CO₂) über den gesamten Lebenszyklus, ADAC motorwelt 4/18, S. 18-22.

[Agora Verkehrswende 2019a] Klimabilanz von Elektroautos – Einflussfaktoren und Verbesserungspotenzial, ifeu – Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg GmbH, Bericht im Auftrag von Agora Verkehrswende, April 2019.

[Agora Verkehrswende 2019b] Klimabilanz von strombasierten Antrieben und Kraftstoffen, ifeu – Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg GmbH, Bericht im Auftrag von Agora Verkehrswende, Dezember 2019.

[Ahmadi und Kjeang 2017] Realistic simulation of fuel economy and life cycle metrics for hydrogen fuel cell vehicles, in: International Journal of Energy Research, Vol. 41, Ausgabe 5, S. 714-727.

[Amarakoon, Smith und Segal 2013] Application of Life-Cycle Assessment to Nanoscale Technology: Lithium-ion Batteries for Electric Vehicles, Bericht im Auftrag der U.S. Environmental Protection Agency (US EPA), Design for the Environment Program, April 2013.

[Ambrose und Kendall 2016] Effects of battery chemistry and performance on the life cycle greenhouse gas intensity of electric mobility, in: Transportation Research Teil D, Vol. 47, S. 182-194.

[Ardey 2018] Future Technology Mix for Emission-Free Mobility, Dr. Nikolai Ardey, AUDI AG, 27. Aachener Kolloquium Fahrzeug- und Motorentechnik 2018, Oktober 2018.

[Assefa Hagos und Ahlgren 2018] Well-to-wheel assessment of natural gas vehicles and their fuel supply infrastructures – Perspectives on gas in transport in Denmark, in: Transportation Research Teil D, Vol. 65, S. 14-35.

[Bartolozzi, Rizzi und Frey 2013] Comparison between hydrogen and electric vehicles by life cycle assessment: A case study in Tuscany, Italy, in: Applied Energy, Vol. 101, S. 103-111.

[Bauer et al. 2015] The environmental performance of current and future passenger vehicles: Life cycle assessment based on a novel scenario analysis framework, in: Applied Energy, Vol. 157, S. 871-883.

[Baumann et al. 2019] Reducing the Environmental Impacts of Electric Vehicles and Electricity Supply: How Hourly Defined Life Cycle Assessment and Smart Charging Can Contribute, in: World Electric Vehicle Journal, Vol. 10, S. 13.

[Bekel und Pauliuk 2019] Prospective cost and environmental impact assessment of battery and fuel cell electric vehicles in Germany, in: The International Journal of Life Cycle Assessment, Vol. 19, Nr. 24, S. 2220-2237.

[Bicer und Dincer 2018] Life cycle environmental impact assessments and comparisons of alternative fuels for clean vehicles, in: Resources, Conservation & Recycling, Vol. 132, S. 141-157.

[Boureima et al. 2009] Comparative LCA of electric, hybrid, LPG and gasoline cars in Belgian context, in: World Electric Vehicle Journal, Vol. 3, S. 469-476.

[Boureima et al. 2011] CLEVER – Clean Vehicles Research: LCA and Policy Measures, LCA report, Vrije Universiteit Brussel, Department of Electrical Engineering and Energy Technology (ETEC), Mobility and Automotive Technology Research Group (MOBI).

[Buchal, Karl und Sinn 2019] Kohlemotoren, Windmotoren und Dieselmotoren: Was zeigt die CO₂-Bilanz?, ifo Institut für Wirtschaftsforschung, ifo Schnelldienst 8 / 2019, 72. Jahrgang, April 2019.

[Burnham, Wang und Wu 2006] Development and Applications of GREET 2.7 – The Transportation Vehicle-Cycle Model, Argonne National Laboratory, Energy Systems Division, November 2006.

[Camargo Aguirre et al. 2012] Lifecycle Analysis Comparison of a Battery Electric Vehicle and a Conventional Gasoline Vehicle, in: Frontiers in Energy, Vol. 6, S. 107-111.

[Chéron, Gilbert-d'Halluin und Schuller 2017] Quelle contribution du véhicule électrique à la transition écologique en France? – Enjeux environnementaux et perspectives d'intégration des écosystèmes Mobilité et Energie, Fondation pour la Nature et l'Homme, Dezember 2017.

[Chester und Horvath 2009] Environmental assessment of passenger transportation should include infrastructure and supply chains, in: *Environmental Research Letters*, Vol. 4.

[Concawe 2018] Life-cycle analysis – a look into the key parameters affecting life-cycle CO₂ emissions of passenger cars, *Concawe Review* Volume 27, Nr. 1, Juli 2018.

[Daimler AG 2014] Life Cycle. Umweltzertifikat Mercedes-Benz B-Klasse Electric Drive, Mercedes-Benz Cars, Oktober 2014.

[Del Pero, Delogu und Pierini 2018] Life Cycle Assessment in the automotive sector: a comparative case study of Internal Combustion Engine (ICE) and electric car, *AIAS 2018 International Conference on Stress Analysis*, in: *Frontiers in Energy*, Vol. 12, S. 521-537.

[Dunn et al. 2012] Impact of Recycling on Cradle-to-Gate Energy Consumption and Greenhouse Gas Emissions of Automotive Lithium-Ion Batteries, in: *Environmental Science & Technology*, Vol. 46, Nr. 22, S. 12704-12710.

[Ellingsen et al. 2014] Life Cycle Assessment of a Lithium-Ion Battery Vehicle Pack, in: *Journal of Industrial Ecology*, Vol. 18, Nr. 1, S. 113-124.

[Ellingsen, Singh und Stromman 2016] The size and range effect: lifecycle greenhouse gas emissions of electric vehicles, in: *Environmental Research Letters*, Vol. 11.

[European Commission 2014] WELL-TO-WHEELS Report Version 4. a JEC WELL-TO-WHEELS ANALYSIS, Gemeinsame Forschungsstelle der Europäischen Kommission (JRC), EUCAR und CONCAWE, Luxemburg, Edwards et al.

[Evangelisti et al. 2017] Life cycle assessment of a polymer electrolyte membrane fuel cell system for passenger vehicles, in: *Journal of Cleaner Production*, Vol. 142, S. 4339-4355.

[Gao und Winfield 2012] Life Cycle Assessment of Environmental and Economic Impacts of Advanced Vehicles, in: *Energies*, Vol. 5, S. 605-620.

[Girardi, Gargiulo und Brambilla 2015] A comparative LCA of an electric vehicle and an internal combustion engine vehicle using the appropriate power mix: the Italian case study, in: *The International Journal of Life Cycle Assessment*, Vol. 19, Nr. 20, S. 1127-1142.

[Granovskii, Dincer und Rosen 2006] Economic and environmental comparison of conventional, hybrid, electric and hydrogen fuel cell vehicles, in: *Journal of Power Sources*, Vol. 159, S. 1186-1193.

[Hall und Lutsey 2018] Effects of battery manufacturing on electric vehicle life-cycle greenhouse gas emissions, *International Council on Clean Transportation (ICCT)*, Briefing, Februar 2018.

[Hao et al. 2017] GHG Emissions from the Production of Lithium-Ion Batteries for Electric Vehicles in China, in: *Sustainability*, Vol. 9, S. 504.

[Hawkins et al. 2012] Comparative environmental life cycle assessment of conventional and electric vehicles, in: *Journal of Industrial Ecology*, Vol. 17, Nr. 1, S. 53-64.

[Held und Baumann 2011] Assessment of the Environmental Impacts of Electric Vehicle Concepts, Konferenzbeitrag, *Towards Life Cycle Sustainability Management*, M. Finkbeiner (Hrsg.), S. 535-546.

[Held et al. 2016] Abschlussbericht: Bewertung der Praxistauglichkeit und Umweltwirkungen von Elektrofahrzeugen, NOW GmbH – Nationale Organisation Wasserstoff und Brennstoffzellentechnologie, Bericht für das Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI).

[Helmers und Marx 2012] Electric cars: technical characteristics and environmental impacts, in: *Environmental Sciences Europe*, Vol. 24, Nr. 14.

[Helms et al. 2016] Weiterentwicklung und vertiefte Analyse der Umweltbilanz von Elektrofahrzeugen, ifeu – Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg GmbH, Bericht für das Umweltbundesamt, Texte 27/2016, April 2016.

[Ifeu 2011] Wissenschaftlicher Grundlagenbericht: Umweltbilanzen Elektromobilität (UMBReLa), ifeu – Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg GmbH, Bericht für das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU), Oktober 2011.

[Jungmeier et al. 2019] Geschätzte Treibhausgasemissionen und Primärenergieverbrauch in der Lebenszyklusanalyse von Pkw-basierten Verkehrssystemen, Forschungsgesellschaft Joanneum Research, Studie für den Österreichischen Automobil- und Touringclub (ÖAMTC), FIA und ADAC, September 2019.

[Karaaslan, Zhao und Tatari 2018] Comparative life cycle assessment of sport utility vehicles with different fuel options, in: *The International Journal of Life Cycle Assessment*, Vol. 19, Nr. 23, S. 333-347.

[Kawamoto et al. 2019] Estimation of CO₂ Emissions of Internal Combustion Engine Vehicle and Battery Electric Vehicle Using LCA, in: *Sustainability*, Vol. 11, S. 2690.

[Kim et al. 2016] Cradle-to-Gate Emissions from a Commercial Electric Vehicle Li-Ion Battery: A Comparative Analysis, in: *Environmental Science & Technology*, Vol. 50, Nr. 14, S. 7715-7722.

[Kukreja 2018] Life-Cycle Analysis of Electric Vehicles – Quantifying the Impact, Bericht im Rahmen des Programms Greenest City Scholars (GCS), Stadt Vancouver, August 2018.

[La Picirelli de Souza et al. 2018] Comparative environmental life cycle assessment of conventional vehicles with different fuel options, plug-in hybrid and electric vehicles for a sustainable transportation system in Brazil, in: *Journal of Cleaner Production*, Vol. 203, S. 444-468.

- [Lane 2006] Life cycle assessment of vehicle fuels and technologies, Ecolane Transport Consultancy, Abschlussbericht für den Borough of Camden, London, März 2006.
- [Le Petit 2017] Electric vehicle life-cycle analysis and raw material availability, Transport & Environment, Briefing, Oktober 2017.
- [Li, Zhang und Li 2016] A comparative assessment of battery and fuel cell electric vehicles using a well-to-wheel analysis, in: *Energies*, Vol. 94, S. 693-704.
- [Lombardi et al. 2017] Comparative environmental assessment of conventional, electric, hybrid and fuel cell powertrains based on LCA, in: *The International Journal of Life Cycle Assessment*, Vol. 19, Nr. 22, S. 1989-2006.
- [Lucas, Silva und Neto 2012] Life-cycle analysis of energy supply infrastructure for conventional and electric vehicles, in: *Energy Policy*, Vol. 41, S. 537-547.
- [Majeau-Bettez, Hawkins und Stromman 2011] Life Cycle Environmental Assessment of Lithium-Ion and Nickel Metal Hydride Batteries for Plug-in Hybrid and Battery Electric Vehicles, in: *Environmental Science & Technology*, Vol. 45, Nr. 10, S. 4548-4554.
- [Messagie et al. 2014] A Range-Based Vehicle Life Cycle Assessment Incorporating Variability in the Environmental Assessment of Different Vehicle Technologies and Fuels, in: *Energies*, Vol. 7, S. 1467-1482.
- [Miotti, Hofer und Bauer 2017] Integrated environmental and economic assessment of current and future fuel cell vehicles, in: *The International Journal of Life Cycle Assessment*, Vol. 22, S. 94-110.
- [Nanaki und Koroneos 2013] Comparative economic and environmental analysis of conventional, hybrid and electric vehicles – the case study of Greece, *Journal of Cleaner Production*, Vol. 53, S. 261-266.
- [Nealer, Reichmuth und Anair 2015] Cleaner Cars from Cradle to Grave – How Electric Cars Beat Gasoline Cars on Lifetime Global Warming Emissions, Union of Concerned Scientists, November 2015.
- [Nordelöf et al. 2014] Environmental impacts of hybrid, plug-in hybrid and battery electric vehicles—what can we learn from life cycle assessment?, in: *The International Journal of Life Cycle Assessment*, Vol. 19, Nr. 19, S. 1866-1890.
- [Notter et al. 2010] Contribution of Li-Ion Batteries to the Environmental Impact of Electric Vehicles, in: *Environmental Science & Technology*, Vol. 44, S. 6550-6556.
- [Notter et al. 2015] Life cycle assessment of PEM FC applications: electric mobility and μ -CHP, in: *Energy & Environmental Science*, Vol. 8, S. 1969-1985.
- [Onat, Kucukvar und Tatari 2015] Conventional, hybrid, plug-in hybrid or electric vehicles? State-based comparative carbon and energy footprint analysis in the United States, in: *Applied Energy*, Vol. 150, S. 36-49.
- [Peters et al. 2017] The environmental impact of Li-Ion batteries and the role of key parameters – A review, in: *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 67, S. 491-506.
- [Philippot et al. 2019] Eco-Efficiency of a Lithium-Ion Battery for Electric Vehicles: Influence of Manufacturing Country and Commodity Prices on GHG Emissions and Costs, in: *Batteries*, Vol. 5, S. 23.
- [Poovanna, Davis und Argue 2018] Environmental Life Cycle Assessment of Electric Vehicles in Canada, Supplementary information, Juli 2018.
- [Pötscher et al. 2014] Ökobilanz alternativer Antriebe – Elektrofahrzeuge im Vergleich, Umweltbundesamt Österreich, Bericht im Auftrag des Bundesministeriums für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft, Wien 2014.
- [Prevedouros und Mitropoulos 2016] Life-cycle emissions and Cost Study of Light Duty Vehicles, in: *Transportation Research Procedia*, Vol. 15, S. 749-760.
- [Raykin, Maclean und Roorda 2012] Implications of driving patterns on well-to-wheel performance of plug-in hybrid electric vehicles, in: *Environmental Science & Technology*, Vol. 46, Nr. 11, S. 6363-6370.
- [Regett, Mauch und Wagner 2019] Klimabilanz von Elektrofahrzeugen – Ein Plädoyer für mehr Sachlichkeit, Forschungsstelle für Energiewirtschaft e.V. (FfE).
- [Romare und Dahllöf 2017] The Life-Cycle Energy Consumption and Greenhouse Gas Emissions from Lithium-Ion Batteries – A Study with Focus on Current Technology and Batteries for Light-Duty Vehicles, Schwedisches Umweltinstitut (IVL), Studie im Auftrag der schwedischen Energiebehörde (Energimyndigheten) und der schwedische Transportverwaltung (Trafikverket), Mai 2017.
- [Samaras und Meisterling 2008] Life Cycle Assessment of Greenhouse Gas Emissions from Plug-in Hybrid Vehicles: Implications for Policy, in: *Environmental Science & Technology*, Vol. 42, S. 3170-3176.
- [Simons und Bauer 2015] A life-cycle perspective on automotive fuel cells, in: *Applied Energy*, Vol. 157, S. 884-896.
- [Song et al. 2018] Well-to-wheel GHG emissions and mitigation potential from light-duty vehicles in Macau, in: *The International Journal of Life Cycle Assessment*, Vol. 19, Nr. 23, S. 1916-1927.
- [Sörensen 2004] Total life-cycle assessment of PEM fuel cell car, in: *Proc. of Hypothesis V, Hydrogen Conference*, Porto Conte, Sardinien, Time-simulations of renewable energy plus hydrogen systems, M. Marini, & G. Spazzafumo (Hrsg.), S. 35-42.
- [Sternberg, Hank und Hebling 2019] Treibhausgas-Emissionen für Batterie- und Brennstoffzellenfahrzeuge mit Reichweiten über 300 km, Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE, Studie im Auftrag von H₂ Mobility, Juli 2019.
- [Tagliaferri et al. 2016] Life cycle assessment of future electric and hybrid vehicles: A cradle-to-grave systems engineering approach, in: *Chemical Engineering Research and Design*, Vol. 112, S. 298-309.

- [**Tamayo et al. 2015**] Regional Variability and Uncertainty of Electric Vehicle Life Cycle CO₂ Emissions across the United States, in: *Environmental Science & Technology*, Vol. 49, S. 8844–8855.
- [**UNITI 2019**] Die CO₂-Gesamtbilanz für Antriebstechnologien im Individualverkehr heute und in Zukunft – Lebenszyklusanalysen als Basis für zielführende Klimapolitik und Regularien, Frontier Economics, Bericht für UNITI Bundesverband mittelständischer Mineralölunternehmen e. V., November 2019.
- [**Van Mierlo, Messagie und Rangaraju 2017**] Comparative environmental assessment of alternative fueled vehicles using a life cycle assessment, in: *Transportation Research Procedia*, Vol. 25, S. 3435-3445.
- [**Volkswagen AG 2010**] Die Umweltbilanz des Golf, Der Golf – Hintergrundbericht Umweltprädikat, Volkswagen AG Konzernforschung Umwelt Produkt, Dezember 2010.
- [**Volkswagen AG 2019**] Klimabilanz von E-Fahrzeugen & Life Cycle Engineering, Präsentation, April 2019.
- [**Wang et al. 2017**] Quantifying the environmental impact of a Li-rich high-capacity cathode material in electric vehicles via life cycle assessment, in: *Environmental Science and Pollution Research*, Vol. 24, S. 1251-1260.
- [**Wietschel, Kühnbach und Rüdiger 2019**] Die aktuelle Treibhausgasemissionsbilanz von Elektrofahrzeugen in Deutschland, Fraunhofer ISI, Working Paper Sustainability and Innovation Nr. S 02/2019.
- [**Wietschel et al. 2019**] Klimabilanz, Kosten und Potenziale verschiedener Kraftstoffarten und Antriebssysteme für Pkw und Lkw, Endbericht, Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI, in Zusammenarbeit mit der Technischen Universität Hamburg (TUHH) und IREES GmbH – Institut für Ressourceneffizienz und Energiestrategien, Studie gefördert von Biogasrat+ e. V., September 2019.
- [**Yuksel et al. 2016**] Effect of regional grid mix, driving patterns and climate on the comparative carbon footprint of gasoline and plug-in electric vehicles in the United States, in: *Environmental Research Letters*, Vol. 11.
- [**Zackrisson, Avellan und Orlenius 2010**] Life cycle assessment of lithium-ion batteries for plug-in hybrid electric vehicles: Critical issues, in: *Journal of Cleaner Production*, Vol. 18, S. 1517-1527.
- [**Zamel und Li 2006**] Life-cycle analysis of vehicles powered by a fuel cell and by internal combustion engine for Canada, in: *Journal of Power Sources*, Vol. 155, S. 297-310.
- [**Zapf et al. 2019**] Kosteneffiziente und nachhaltige Automobile: Bewertung der realen Klimabelastung und der Gesamtkosten – Heute und in Zukunft, Springer Vieweg.

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1 | S. 8 | Stagnierende Emissionen im Verkehrssektor [Frontier Economics basierend auf Daten von Eurostat und BMVI (2019)]

Abb. 2 | S. 10 | Das globale Budget für CO₂-Äq ist begrenzt [Frontier Economics basierend auf IPCC]

Abb. 3 | S. 10 | Regierungen setzen das Budget in nationale Jahresziele um [Frontier Economics]

Abb. 4 | S. 10 | Phasen des Lebenszyklus [Frontier Economics]

Abb. 5 | S. 13 | Basierend auf den CO₂-Lebenszyklusanalysen geht keine der Technologien als klarer Sieger hervor [Frontier Economics basierend auf über 80 Studien]

Abb. 6 | S. 15 | Die zeitliche Dimension ist bei großen einmaligen Emissionen ein entscheidender Faktor [Frontier Economics]

Abb. 7 | S. 16 | Emissionen im Mobilitätssektor haben trotz höherem Wirkungsgrad zugenommen [Frontier Economics basierend auf Daten von Eurostat und vom BMVI (2019)]

Abb. 8 | S. 21 | Nationale, sektorspezifische Betrachtungen geben nur wenig Aufschluss über die Auswirkungen einer Technologie [Frontier Economics]

Abb. 9 | S. 21 | Klimamodelle des IPCC zeigen einen direkten Zusammenhang zwischen akkumulierten CO₂-Emissionen und Temperaturanstieg [IPCC (2018), Sonderbericht: 1,5°C Globale Erwärmung, Abbildung 2.3]

Abb. 10 | p. 23 | Eine umfassende Analyse des CO₂-Fußabdrucks erfordert immer eine detaillierte Betrachtung aller Abschnitte des Lebenszyklus und aller Auswirkungen in vor- und nachgelagerten Sektoren [Frontier Economics]

Abb. 11 | S. 25 | Es stehen umfangreiche Quellen mit einer breiten Datenbasis zur Verfügung – unsere Metaanalyse konzentriert sich auf 85 internationale Studien aus den letzten 15 Jahren [Frontier Economics]

Abb. 12 | S. 26 | Die Energieinfrastruktur bleibt in vielen Lebenszyklusanalysen unberücksichtigt (n = 85 Studien) [Frontier Economics]

Abb. 13 | S. 27 | Einige Antriebe (ungeachtet möglicher Technologieoptionen) werden nur in wenigen Studien angesprochen [Frontier Economics]

Abb. 14 | S. 30 | Auf Grundlage einer Lebenszyklusanalyse weisen verschiedene Antriebskonzepte ähnliche Gesamtemissionen auf [Frontier Economics basierend auf mehr als 80 verschiedenen Studien]

Abb. 15 | S. 32 | Batterie- und Brennstoffzellenproduktion sind zentrale Faktoren für Emissionen bei der Fahrzeugherstellung [Frontier Economics]

Abb. 16 | S. 34 | Strommix und Verbrauch sind ausschlaggebend für Well-to-Wheel-Emissionen [Frontier Economics]

Abb. 17 | S. 36 | Ob ein Infrastrukturausbau erforderlich ist, hängt von der bestehenden Infrastruktur und eventuellen Lücken ab [Frontier Economics]

Abb. 18 | S. 39 | Infrastrukturemissionen werden nur selten analysiert, sind aber möglicherweise relevant [Frontier Economics basierend auf verschiedenen Studien, die in diesem Abschnitt genannt werden.]

Abb. 19 | S. 40 | Hohe Unsicherheit bzgl. der Hauptfaktoren für End-of-Life-Emissionen [Frontier Economics]

Abb. 20 | S. 45 | Im Verkehrssektor bleibt nur noch ein sehr geringes CO₂-Budget, um die Zwischenziele für 2030 zu erreichen [Frontier Economics]

Abb. 21 | S. 48 | Deutschlands Ziel, bis zu 10,5 Millionen BEVs auf die Straße zu bringen, führt hauptsächlich zu einer Verschiebung der Emissionen in die Sektoren Energie und Industrie [Frontier Economics basierend auf NPM AG 1 (2019), den Ergebnissen dieser Metaanalyse und zusätzlichen Quellen wie IEA (2018).]

Die Studie ›Cradle-to-Grave-Lebenszyklusanalyse im Mobilitätssektor - Metastudie zur CO₂-Bilanz alternativer Fahrzeugantriebe‹ dient lediglich zur allgemeinen Orientierung. Leser sollten ohne gezielte fachliche Beratung keine Handlungsempfehlungen aus der vorliegenden Studie ableiten. FVV übernimmt keine Gewähr für die Richtigkeit und Vollständigkeit der Informationen und haftet nicht für Schäden, die sich ggf. aus der Verwendung der hier enthaltenen Informationen ergeben.

Ein Thesenpapier fasst die Ergebnisse der Studie zusammen:

›**Effizienter Einsatz des CO₂-Restbudgets im Mobilitätssektor – 4 Thesen auf Basis einer Metastudie zu Lebenszyklusanalysen**‹

Beide Publikationen sind online abrufbar:

→ www.fvv-net.de | Medien

→ www.primemovers.de | Denken



HERAUSGEBER

Forschungsvereinigung
Verbrennungskraftmaschinen e.V.
Lyoner Strasse 18
60528 Frankfurt am Main
www.fvv-net.de
www.primemovers.de

AUSGABE

R595 | 2020

AUTOREN

Dr. David Bothe und Theresa Steinfort,
Frontier Economics Ltd.

REDAKTION

Dietmar Goericke, Ralf Thee
und Petra Tutsch, FVV

DRUCK

h. reuffurth gmbh

BILDNACHWEIS

Cover: Martisans / Stocksy, Adobe Stock

Klimaschutz im Mobilitätssektor verlangt einen nachhaltigen Ansatz.

Zu diesem Schluss kommt die neue Metaanalyse zur »Cradle-to-Grave«-Lebenszyklusbewertung alternativer Antriebstechnologien, die gemeinsam von FVV und Frontier Economics durchgeführt wurde. Politische Entscheidungsträger, Industrie und Verbraucher benötigen für eine objektive Beurteilung alternativer Antriebslösungen, robustes und zuverlässiges Datenmaterial. Für diese neue Analyse wurden mehr als 80 Studien zur Ökobilanzierung von Fahrzeugen und alternativen Antrieben aus den letzten 15 Jahren ausgewertet. Aus Sicht des Klimaschutzes liegt keine der Technologien klar an der Spitze. Null-Emissionen und Klimaneutralität bis 2050 erfordern einen technologieoffenen, sektorübergreifenden, globalen und langfristigen Ansatz.

Forschungsvereinigung Verbrennungskraftmaschinen e.V.
Research Association for Combustion Engines

Lyoner Strasse 18 | 60528 Frankfurt/M. | Germany
T +49 69 6603 1345 | F +49 69 6603 2345 | info@fvv-net.de

www.fvv-net.de | www.primemovers.de