

VERGLEICH VON STUDIEN ZUR CO₂-GESAMTBILANZ FÜR ANTRIEBSTECHNOLOGIEN IM INDIVIDUALVERKEHR

Eine Vergleichsstudie

Mai 2020



Studie im Auftrag von:



UNITI Bundesverband
mittelständischer
Mineralölunternehmen e. V.

UNITI Bundesverband mittelständischer Mineralölunternehmen e. V.

Jägerstraße 6

10117 Berlin

www.uniti.de

 030 755 414 300

Ansprechpartner

Dirk Arne Kuhrt

 kuhrt@uniti.de

Elmar Kühn

 kuehn@uniti.de

Jens Perner

 +49 221 337 13 102

 jens.perner@frontier-economics.com

Theresa Steinfort

 +49 221 337 13 139

 theresa.steinfort@frontier-economics.com

Frontier Economics Ltd ist Teil des Frontier Economics Netzwerks, welches aus zwei unabhängigen Firmen in Europa (Frontier Economics Ltd) und Australien (Frontier Economics Pty Ltd) besteht. Beide Firmen sind in unabhängigem Besitz und Management, und rechtliche Verpflichtungen einer Firma erlegen keine Verpflichtungen auf die andere Firma des Netzwerks. Alle im hier vorliegenden Dokument geäußerten Meinungen sind die Meinungen von Frontier Economics Ltd.

INHALT

1.	Zielsetzung: Einordnung von CO₂-Lebenszyklusanalysen für Antriebstechnologien von Fahrzeugen	4
2.	Die politische Debatte benötigt die ganzheitliche Betrachtung über den Lebenszyklus	6
3.	Wir vergleichen relevante LCA-Studien anhand eines Kriterienrasters	9
	Auswahl fokussiert auf aktuelle LCA-Studien	9
	Studienvergleich orientiert sich an einem definierten Kriterienraster	10
4.	Der Studienvergleich zeigt, dass breiter angelegte Studien keiner Technologie die alleinige Vorteilhaftigkeit zusprechen	12
	Methodik und Annahmen in den Studien variieren deutlich	12
	Die resultierenden CO ₂ -Bilanzen zeigen kein einheitliches Bild bezüglich der Vorteilhaftigkeit von Technologien	23
	Je breiter der Analyserahmen, desto vielfältiger bzw. ausgeglichener die CO ₂ -Bilanzen der einzelnen Technologien	26
5.	Fazit und Schlussfolgerungen	28
ANNEX A	Qualitative Einordnung der Studien	30
ANNEX B	Referenzen	34

1. ZIELSETZUNG: EINORDNUNG VON CO₂-LEBENSZYKLUSANALYSEN FÜR ANTRIEBSTECHNOLOGIEN VON FAHRZEUGEN



Lebenszyklusanalysen

geben Aufschluss über die CO₂-Gesamtbilanz von Antriebstechnologien.

Im Zuge des Pariser Übereinkommens 2015 haben sich die Europäische Union und die Bundesrepublik ambitionierte Klimaschutzziele gesetzt. Bis 2050 sollen die jährlichen Treibhausgasemissionen (insbesondere CO₂-Emissionen) um 80-95% gegenüber 1990 reduziert werden. Mit dem Green Deal bekannte die Europäische Union sich darüber hinaus zu dem Ziel, bis 2050 komplett klimaneutral zu werden, was eine (nahezu) komplette Vermeidung von CO₂-Ausstoß in allen energieverbrauchenden Sektoren ab der Mitte des Jahrhunderts bedeuten würde.

Diese Klimaschutzziele hat die Bundesregierung auf Zwischenziele für die Jahre 2030 und 2050 sowie auf die verschiedenen Sektoren weiter heruntergebrochen. Der Verkehrssektor beispielsweise soll die jährlichen CO₂-Emissionen bis 2030 um 40% gegenüber 1990 reduzieren. Trotz Effizienzsteigerungen bei den Motoren und trotz sinkender Durchschnittsverbräuche konnte der Sektor bisher allerdings keine CO₂-Einsparungen erzielen, da eine gestiegene Mobilitätsnachfrage, auch aufgrund der geografischen Lage Deutschlands als zentrales Transitland im EU-Binnenmarkt, CO₂-Reduktionen kompensiert hat.

Die relativ konstanten CO₂-Emissionen im Verkehrssektor haben eine politische Diskussion um mögliche Konzepte und Technologien entfacht, mit denen die Sektorziele eingehalten werden können. Oft werden dabei Technologien wie batterieelektrische Fahrzeuge (Battery Electric Vehicle, BEV) als das Mittel der Wahl gesehen, weil die Nutzung von BEV augenscheinlich keine CO₂-Emissionen verursacht, die dem Verkehrssektor zugerechnet werden. So entstehen keine Abgase bei der Nutzung von BEV (sogenannte Tank-to-Wheel Emissionen). Dagegen entstehen bei Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor (Internal Combustion Engine Vehicles, ICEV), die das Gros der Bestandsflotte ausmachen, stets Emissionen bei der Verbrennung.

Allerdings ist diese Perspektive beschränkt und übersieht Emissionen, die durch die jeweiligen Antriebstechnologien in anderen Bereichen (anderen Industrien und mitunter anderen Ländern und zeitlich verschoben) verursacht werden. So fallen bei



Der **politische Fokus** liegt derzeit fast allein auf BEV – doch **emissionsfrei** sind BEV in Wirklichkeit keineswegs.

der Erzeugung des für den Betrieb von BEV notwendigen Ladestroms je nach Emissionsintensität des Strommixes mitunter erhebliche Mengen CO₂ an. Zudem ist die Herstellung der Batterien von Elektroautos sehr energieintensiv und findet derzeit mehrheitlich in Ländern mit einem hohen Kohlestromanteil (v.a. Südostasien wie China) statt, wodurch ein BEV bereits mit einem schweren „CO₂-Rucksack“ den Produktionsprozess verlässt. Der Klimawandel ist jedoch ein globales Phänomen und wird durch die auf der Erde insgesamt akkumulierten Treibhausgasemissionen bestimmt. Das bedeutet, dass es für das Klima unerheblich ist, in welchem Sektor (oder in welchem Land oder zu welchem Zeitpunkt) CO₂ emittiert wird. Aus diesem Grund ist es essenziell, CO₂-Bilanzen gesamtheitlich zu erfassen, nämlich über den gesamten Lebenszyklus hinweg (Lebenszyklusanalyse, Life Cycle Assessment, LCA).

Als Beitrag zur Diskussion hat Frontier Economics im Auftrag des UNITI e.V. die Studie „Die CO₂-Gesamtbilanz für Antriebstechnologien im Individualverkehr heute und in Zukunft – Lebenszyklusanalysen als Basis für zielführende Klimapolitik und Regularien“ erstellt, die im November 2019 der Öffentlichkeit vorgestellt wurde. Im Laufe des vergangenen Jahres sind zudem weitere Studien veröffentlicht worden, die ähnliche Fragestellungen analysieren. Um eine Einordnung der verschiedenen Studien zu ermöglichen, hat UNITI e.V. Frontier Economics beauftragt, eine Vergleichsanalyse verschiedener, kürzlich - vorrangig in Deutschland - erstellter Studien zur CO₂-Gesamtbilanz von Antriebstechnologien im Straßenverkehr zu erstellen.

Ziel dieser Kurzstudie ist es somit, die betrachtete Studienauswahl anhand eines übergeordneten Kriterienrasters zu vergleichen und relativ zueinander einzuordnen. Hierbei soll aufgezeigt werden, inwieweit es Übereinstimmungen bzw. Abweichungen zwischen den Studien hinsichtlich Methodik, Anwendungsfällen und Analyseergebnissen gibt. Dagegen ist es nicht Ziel, die Lebenszyklusanalysen der jeweiligen Studien gänzlich vergleichbar zu machen oder einzelne Annahmen oder Treiber der Ergebnisse detailliert zu untersuchen.



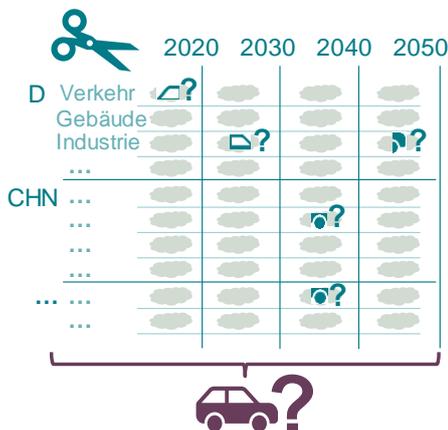
**Wissenschaft, Politik,
Öffentlichkeit:** Seit 2019
wird der CO₂-LCA-Ansatz
verstärkt debattiert.

2. DIE POLITISCHE DEBATTE BENÖTIGT DIE GANZHEITLICHE BETRACHTUNG ÜBER DEN LEBENSZYKLUS



Vor dem Hintergrund des noch verfügbaren CO₂-Budgets sollten **Technologien** daran gemessen werden, wie gut sie sich für das effektive „Haushalten“ dieses Budgets eignen.

Statt ganzheitlicher Technologiebetrachtung erfolgen **separate Betrachtungen** nach Jahren/ Ländern/ Sektoren:



Die derzeitigen Klimaschutzmaßnahmen sind die Reaktion der Politik auf die Ergebnisse der Berichte des Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Diese schlussfolgern, dass nur noch eine Restmenge (Budget) von 420 bis 580 Gigatonnen CO₂-Äquivalenten in die Atmosphäre emittiert werden darf, wenn die Klimaerwärmung auf 2° C - und möglichst 1.5° C - gegenüber dem vorindustriellem Niveau begrenzt bleiben soll. Wird mehr CO₂ emittiert als das Budget erlaubt, steigt die Erderwärmung den Klimamodellen zufolge über dieses Ziel hinaus. Ziel aller Klimaschutzmaßnahmen sollte es also sein, die Menge der Emissionen auf das vorhandene Budget zu limitieren. Jede Technologie sollte daher daran gemessen werden, wie gut sie sich für das effektive Haushalten dieses globalen CO₂-Budgets eignet.

Auf der anderen Seite wird in der Klimapolitik beim Versuch, das globale CO₂-Budget messbarer und greifbarer zu machen, eine zunehmende Tendenz zu isolierten Zielfestlegungen erkennbar, wie z.B.

- **jährliche** Ziele: Das Budget an CO₂-Emissionen wird auf Jahre heruntergebrochen. Ankerpunkte sind hierbei bestimmte Zieljahre, also z.B. in Europa oder Deutschland v.a. 2020, 2030 und 2050.
- **nationale** Ziele: Jeder Staat legt eigene, nationale Ziele fest.
- **Sektorziele**: Tendenziell werden für alle Wirtschaftssektoren einzelne Ziele festgelegt.

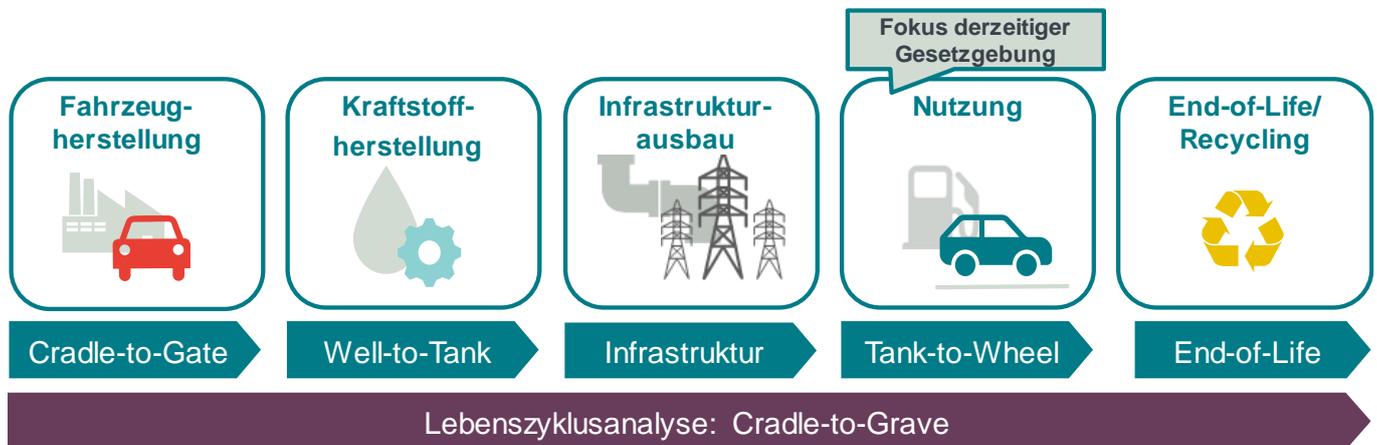
Diese Aufteilung der Klimaschutzziele macht sich auch bei der Analyse der CO₂-Emissionen eines Pkw über seinen Lebenszyklus bemerkbar. Es ist augenfällig, dass die verschiedenen Lebenszyklusabschnitte eines Pkw in gänzlich verschiedenen Sektoren und daher von unterschiedlichen Regularien erfasst werden. Zudem fallen die Lebenszyklusabschnitte zeitlich auseinander und werden daher von den Regularien zu unterschiedlichen Zeitpunkten erfasst: Die Lebenszyklusabschnitte eines Pkw sind

- die **Fahrzeugherstellung** (Cradle-to-Gate, Industriesektor, Emissionen fallen im Herstellungsjahr an),

VERGLEICH VON STUDIEN ZUR CO₂-GESAMTBILANZ FÜR ANTRIEBSTECHNOLOGIEN IM INDIVIDUALVERKEHR

- die **Energiebereitstellung** (Well-to-Tank, Energiesektor, Emissionen fallen während der Nutzungsdauer an),
- die **Infrastrukturbereitstellung** (Infrastruktur, je nach Technologie Energie- oder Industriesektor, Infrastrukturausbauemissionen, fallen typischerweise vor der Nutzungsphase an),¹
- die **Fahrzeugnutzung** (Tank-to-Wheel, Verkehrssektor, Emissionen fallen während der Nutzungsdauer an), und
- die **Fahrzeuggentsorgung** oder Recycling (End-of-Life, Industrie, Emissionen fallen im letzten Jahr der Nutzung oder im Folgejahr an).

Abbildung 1. Eine ganzheitliche Analyse beachtet alle Lebenszyklusabschnitte



Quelle: Frontier Economics

Anstatt also im Verkehrssektor einen ganzheitlichen Ansatz zu verfolgen, der die verschiedenen Lebensphasen eines Fahrzeugs bei der CO₂-Bilanzierung berücksichtigt, erfolgt aktuell die alleinige Betrachtung der Nutzungsphase.

Grundsätzlich erscheint es zwar oft greifbarer, die klimapolitischen Vorgaben je nach Sektor unterschiedlich und voneinander losgelöst auszugestalten, allerdings können solche isolierten Denkansätze auch zu Fehlentwicklungen im Kontext der globalen klimapolitischen Herausforderung führen:

- Durch die **Fokussierung auf bestimmte Zieljahre**, wie z.B. 2030 oder 2050, **erscheint der CO₂-Reduktionspfad**

¹ Der größte Posten der Infrastrukturbereitstellung ist der Neubau oder der Ausbau der Infrastruktur. Zu den relevanten Posten des Infrastrukturausbaus zählen für batterieelektrische Antriebe insbesondere der Stromnetzausbau, Stromspeicherbau und Aufbau des Ladestationnetzwerks, für Antriebe, die mit E-Fuels angetrieben werden, insbesondere der Bau der Konvertierungsanlagen, für mit Wasserstoff betriebene Fahrzeuge auch der Ausbau der Wasserstoffinfrastruktur bzw. die Umrüstung der bestehenden Erdgasinfrastruktur. Derzeit ist die Datenlage hier noch sehr lückenhaft, weshalb das Gros der LCA-Studien diesen Lebenszyklusabschnitt auslässt (vgl. Frontier Economics (2020), Climate protection in the mobility sector requires a comprehensive, sustainable approach - A meta-analysis of life-cycle analysis studies, eine Studie im Auftrag der Forschungsvereinigung Verbrennungskraftmaschinen (FVV)).

unerheblich, obwohl dieser im Kontext des CO₂-Budgets entscheidend ist: Werden bspw. bereits bei der Herstellung einer bestimmten Fahrzeugantriebstechnologie hohe Einmalemissionen verursacht, können allein diese Emissionen das verbleibende CO₂-Budget ausreizen, selbst wenn mit der Technologie theoretisch das Jahresziel für 2050 erreicht wird. Der Grund ist, dass die Hauptlast der Emissionen (des Herstellungsprozesses) vorzeitig, also vor dem Jahr 2050, anfällt. Es ist also nicht adäquat, CO₂-Ziele allein auf einzelne Zieljahre auszurichten. Vielmehr ist für das Klima entscheidend, wie viele CO₂-Emissionen sich insgesamt in der Atmosphäre akkumuliert haben.

- **Länder- und sektorspezifische Perspektiven führen zu Ineffizienzen gegenüber einer gesamtheitlichen CO₂-Minimierungsstrategie:** Durch die länder- und sektorspezifisch definierten Klimaschutzziele wird eine auf Länder- und Sektorgrenzen limitierte Sichtweise gefördert. CO₂-Reduktionsmaßnahmen werden so nur innerhalb dieser Grenzen unternommen. Lösungsmöglichkeiten dagegen, die sich auch durch internationale und intersektorale Koordination ergeben und ggf. einen sehr wirkungsvollen Beitrag zur CO₂-Budgetproblematik leisten können, werden so von vornherein ausgeschlossen/übersehen. Dies führt zu Ineffizienzen gegenüber einer gesamtheitlichen CO₂-Minimierungsstrategie.
- **Eine länder- und sektorspezifische Perspektive kann zu Ineffektivität führen:** Im schlimmsten Fall werden nicht nur die einfachsten und effizientesten Lösungswege übersehen, sondern die Klimaschutzziele komplett verfehlt (Ineffektivität). Die limitierte Sichtweise innerhalb Sektor- und Ländergrenzen kann statt CO₂-Vermeidung zu CO₂-Verschiebung in andere Sektoren führen. So werden beim BEV zwar keine Abgase auf der Straße emittiert, jedoch fallen bei der Erzeugung des Ladestroms und der Herstellung der Batterien Emissionen an. Im Ergebnis werden Emissionen aus dem Verkehrssektor in den Energie- oder Industriesektor verschoben.

Aus diesen Gründen sind gesamtheitliche Analysen von Technologien - über die Zeit und über Länder- und Sektorgrenzen hinweg - essenziell für eine effektive und effiziente Politikgestaltung. Nur bei einer gesamtheitlichen Bewertung von Antriebstechnologien durch Lebenszyklusanalysen (Life Cycle Assessments, LCA), können politisch die richtigen Weichen gestellt werden, um das effektive und effiziente Erreichen der Klimaschutzziele sicherzustellen.

Im Folgenden gehen wir näher auf aktuelle Studien ein, in denen Lebenszyklusanalysen umgesetzt worden sind.



Der LCA-Ansatz ist essenzielle Basis für **zielführende** und **nachhaltige Klimaschutzpolitik**.

3. WIR VERGLEICHEN RELEVANTE LCA-STUDIEN ANHAND EINES KRITERIENRASTERS

Unsere Vorgehensweise für den Studienvergleich gliedert sich in

- die Auswahl relevanter Studien; sowie
- die Identifikation von relevanten Vergleichskriterien.

Die Studien vergleichen wir anhand eines Kriterienrasters.

Auswahl fokussiert auf aktuelle LCA-Studien

Wie im vorherigen Kapitel erläutert, sollte die gesamtheitliche CO₂-Analyse über den Lebenszyklus von Antriebstechnologien von herausragender Bedeutung für die Klimapolitik im Verkehrssektor sein. Frontier Economics hat vor diesem Hintergrund im November 2019 die Studie „Die CO₂-Gesamtbilanz für Antriebstechnologien im Individualverkehr heute und in Zukunft – Lebenszyklusanalysen als Basis für zielführende Klimapolitik und Regularien“ erstellt. Im Laufe des vergangenen Jahres sind weitere Studien veröffentlicht worden, die ähnliche Fragestellungen analysieren.

Vor diesem Hintergrund stellt sich die Frage, inwieweit sich die Studien inhaltlich, methodisch und im Ergebnis unterscheiden oder ähneln. Um einen Beitrag zur Einordnung der Studien zu leisten, werden im Folgenden ausgewählte kürzlich erstellte Studien zur CO₂-Gesamtbilanz von Antriebstechnologien anhand eines Kriterienrasters verglichen.

Aufgrund der hohen Anzahl verfügbarer Studien fokussieren wir unseren Vergleich auf Studien, die

- aktuell sind, also im letzten Jahr veröffentlicht wurden,
- in der breiten Öffentlichkeit debattiert wurden; und/oder
- im deutschsprachigen Raum erschienen sind.

Abbildung 2 zeigt eine Übersicht über die ausgewählten Studien.

Abbildung 2. Die analysierten Studien im Überblick

Studienabkürzung	Titel der Studie	Autoren	Auftraggeber	Veröffentlichung
Zapf et al.	Kosteneffiziente und nachhaltige Automobile - Bewertung der realen Klimabelastung und der Gesamtkosten - Heute und in Zukunft	Zapf, Pengg, Büttler, Bach, Weindl	-	Dezember 2019
Agora Dezember	Klimabilanz von strombasierten Antrieben und Kraftstoffen	Agora Verkehrswende, ifeu	Agora Verkehrswende	Dezember 2019
Frontier	Die CO ₂ -Gesamtbilanz für Antriebstechnologien im Individualverkehr heute und in Zukunft	Frontier Economics	UNITI e.V.	November 2019
Joanneum	Geschätzte Treibhausgasemissionen und Primärenergieverbrauch in der Lebenszyklusanalyse von Pkw-basierten Verkehrssystemen	Joanneum Research Life	ADAC ÖAMTC FIA	September 2019
Agora April	Klimabilanz von Elektroautos. Einflussfaktoren und Verbesserungspotenzial	Agora Verkehrswende, ifeu	Agora Verkehrswende	April 2019
ifo	Kohlemotoren, Windmotoren und Dieselmotoren: Was zeigt die CO ₂ -Bilanz?	Buchal, Karl, Sinn	-	April 2019
Fraunhofer	Die aktuelle Treibhausgasemissionsbilanz von Elektrofahrzeugen in Deutschland	Fraunhofer ISI	-	März 2019
FfE	Klimabilanz von Elektrofahrzeugen - Ein Plädoyer für mehr Sachlichkeit	Forschungsstelle für Energiewirtschaft	Stiftung Energieforschung BW	Februar 2019

Quelle: Frontier Economics

Hinweis: Die Studien sind hier und im Folgenden, wenn nicht anders gekennzeichnet, anhand ihres Veröffentlichungszeitpunkts geordnet.

Studienvergleich orientiert sich an einem definierten Kriterienraster

Die Auswertung der Studien erfolgt anhand eines definierten Kriterienkatalogs. Wir legen den Fokus auf die folgenden Kriterien:

- Um die **zugrundeliegenden Annahmen und Szenarien** näher zu beleuchten, untersuchen wir die folgenden Fragen:
 1. Werden alle relevanten **Lebenszyklusabschnitte** berücksichtigt?
 2. Wird **Vielfalt der Anwendungsfälle** im Individualverkehr berücksichtigt?
 3. Ist **Vergleichbarkeit** zwischen den Technologien gegeben, ist der Vergleich also „fair“?
 4. Welche der **Antriebstechnologien** werden berücksichtigt?
 5. Welche **Länder** und entsprechenden CO₂-Intensitäten decken die Studien ab?
 6. Welchen **Zeitraumen deckt die Analyse ab** und werden **dynamische Entwicklungen** berücksichtigt?
- Wir vergleichen zudem, in welchen **Größenordnungen** die **Ergebnisse** der Studien liegen. Generell ist jedoch zu beachten, dass die Ergebnisse der einzelnen Studien nur eingeschränkt

VERGLEICH VON STUDIEN ZUR CO₂-GESAMTBILANZ FÜR ANTRIEBSTECHNOLOGIEN IM INDIVIDUALVERKEHR

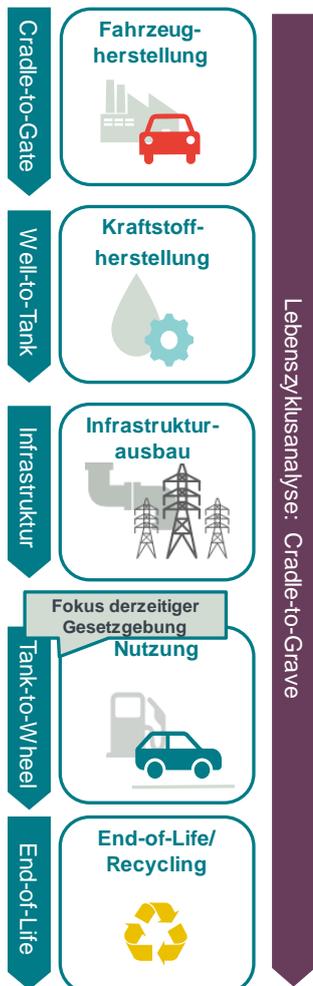
vergleichbar sind.² Die Berechnungen basieren auf unterschiedlichen Fallbeispielen, spezifischen Annahmen, Methodiken und Definitionen. Um eine gewisse Vergleichbarkeit zwischen den Studienergebnissen zu erzielen, passen wir deshalb zumindest die Lebensfahrleistung der untersuchten Fahrzeuge auf 150.000 km an – allerdings bleibt die Vergleichbarkeit der Ergebnisse auch hierbei eingeschränkt.

Im folgenden Kapitel fassen wir die Ergebnisse zusammen.

² Im Abschnitt „3. Ist die Vergleichbarkeit zwischen den Technologien gegeben, ist der Vergleich also „fair“?“ prüfen wir lediglich, ob ein Grundstandard an Vergleichbarkeit sichergestellt ist.

4. DER STUDIENVERGLEICH ZEIGT, DASS BREITER ANGELEGTE STUDIEN KEINER TECHNOLOGIE DIE ALLEINIGE VORTEILHAFTIGKEIT ZUSPRECHEN

Abbildung 3. Abschnitte einer Pkw-Lebenszyklusanalyse



Quelle: Frontier Economics

In diesem Kapitel

- gehen wir zunächst auf unsere Einschätzung zu den Studien bezüglich der einzelnen Untersuchungskriterien ein;
- geben wir einen Überblick über den Vergleich der quantitativen Ergebnisse der Studien; und
- ordnen unsere Einschätzungen zu den Studien schließlich zusammenfassend ein.

Methodik und Annahmen in den Studien variieren deutlich

Im Folgenden gehen wir auf unsere Einschätzung zu den Studien bezüglich der zugrundeliegenden Annahmen und Szenarien ein. Jedes Untersuchungskriterium wird dabei separat von anderen Einflussfaktoren, also *ceteris paribus*, betrachtet.

1. Werden alle relevanten Lebenszyklusabschnitte berücksichtigt?

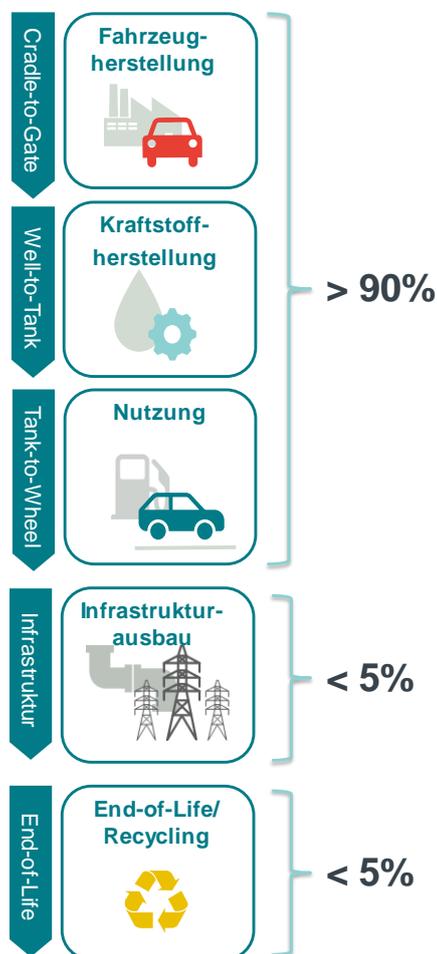
Zunächst gehen wir der Frage nach, wie vollständig der Lebenszyklus von Fahrzeugen in den Studien erfasst wird. Hierbei unterscheiden wir die fünf wesentlichen Lebenszyklusabschnitte (vgl. Abbildung 3)

- Fahrzeugherstellung (Cradle-to-Gate),
- Energiebereitstellung (Well-to-Tank),
- Infrastrukturbereitstellung (Infrastruktur),
- Fahrzeugnutzung (Tank-to-Wheel), und
- Fahrzeugverschrottung oder Recycling (End-of-Life).

Grundsätzlich ist die Erwartungshaltung, dass alle fünf Abschnitte berücksichtigt werden sollten.

Wir kommen hierbei zu folgendem Ergebnis (vgl. auch Abbildung 5):

Abbildung 4. Anteil der Lebenszyklusabschnitte an der CO₂-Gesamtbilanz, in %



Quelle: Frontier Economics

- **Alle Studien berücksichtigen die Stufen Fahrzeugherstellung, Well-to-Tank und Tank-to-Wheel.** Die Stufen Fahrzeugherstellung, Well-to-Tank und Tank-to-Wheel machen mit in der Regel über 90% den größten Anteil der CO₂-Gesamtbilanz der Fahrzeuge aus (siehe auch Abbildung 4).³ Insbesondere für die Stufen Tank-to-Wheel und Fahrzeugherstellung stellt sich die Datenverfügbarkeit als gut dar. Allerdings werden diese Emissionen in der politischen Debatte unterschiedlich wahrgenommen:
 - Die Emissionen, die während der Tank-to-Wheel-Phase verursacht werden, stehen im Fokus der derzeitigen Gesetzgebung im Verkehrssektor, z.B. bei den europäischen Flottengrenzwerten für Neufahrzeuge.
 - Die Emissionen bei der Fahrzeugherstellung und in der Well-to-Tank-Stufe rücken zwar zunehmend in den Fokus, werden aber in den derzeitigen Regularien für den Verkehrssektor noch nicht reflektiert.
- Die Stufe **End-of-Life/Recycling** wird **teilweise gar nicht oder nur sehr oberflächlich berücksichtigt**. Ein Grund dafür ist, dass die hier anfallenden Emissionen nach heutigen Erkenntnissen nur einen verhältnismäßig kleinen Teil von bis zu 5% der im Leben eines Fahrzeugs verursachten CO₂-Emissionen ausmachen.⁴ Zudem gibt es bei der Entsorgung der Batterie von Elektroautos noch wenig Erfahrungswerte, und auch technische Fragen sind noch ungeklärt. Optimistische Schätzungen prognostizieren, dass Batterien im Sinne einer Kreislaufwirtschaft (zumindest teilweise) recycelt und wiederverwendet werden können. In dem Fall könnte diese Lebenszyklusstufe unter Umständen sogar die Klimabilanz verbessern, indem eine CO₂-Emissionsgutschrift anfällt. Andere Quellen dagegen gehen von einer sehr CO₂-intensiven Entsorgung der Batterien aus, da es sehr aufwändig erscheint, die Batterie in ihre Einzelteile zu zerlegen. Wegen dieser Unsicherheit werden End-of-Life Emissionen für das BEV derzeit oft nur pauschal geschätzt.
- Die **Stufe Infrastrukturausbau** (vgl. Fußnote 1) **bleibt regelmäßig unberücksichtigt**. Zum einen kann dies damit begründet werden, dass die Zuteilung der Infrastrukturausbau-Emissionen auf einzelne Technologien herausfordernd ist. Zudem ist die Komplexität und Unsicherheit bei der Erfassung der Infrastrukturausbau-Emissionen sehr hoch. Deshalb wird die Systemgrenze der Lebenszyklusanalysen i.d.R. vor der Infrastruktur gezogen.

³ Vgl. Frontier Economics (2020), Climate protection in the mobility sector requires a comprehensive, sustainable approach - A meta-analysis of life-cycle analysis studies, eine Studie im Auftrag der Forschungsvereinigung Verbrennungskraftmaschinen (FVV).

⁴ Vgl. Frontier Economics (2020).

VERGLEICH VON STUDIEN ZUR CO₂-GESAMTBILANZ FÜR ANTRIEBSTECHNOLOGIEN IM INDIVIDUALVERKEHR

Zum anderen liegt nach Überschlagsrechnungen der Anteil der Infrastrukturausbau-Emissionen an den Gesamtemissionen von Fahrzeugen eher im einstelligen Prozentbereich, könnte also in erster Näherung etwa den Anteil der End-of-Life-Emissionen erreichen.⁵ Es besteht also Forschungsbedarf.

Abbildung 5. Die Studien decken die wesentliche Lebenszyklusabschnitte ab – bei Emissionen v.a. aus Infrastrukturaufbau⁶, aber auch End-of-Life, besteht Forschungsbedarf

	Fahrzeug-herstellung	Well-to-Tank	Infrastruktur	Tank-to-Wheel	End-of-Life
Zapf et al.	✓	✓	✗	✓	✓
Agora Dezember	✓	✓	✗	✓	✓
Frontier	✓	✓	✗	✓	✓
Joanneum	✓	✓	✗	✓	✓
Agora April	✓	✓	✗	✓	✓
ifo	✓	✓	✗	✓	✗
Fraunhofer	✓	✓	✗	✓	✗
FfE	✓	✓	✗	✓	✗

Quelle: Frontier Economics

⁵ Vgl. Frontier Economics (2020), Climate protection in the mobility sector requires a comprehensive, sustainable approach - A meta-analysis of life-cycle analysis studies, eine Studie im Auftrag der Forschungsvereinigung Verbrennungskraftmaschinen (FVV).

⁶ Der größte Posten der Infrastrukturbereitstellung ist der Neubau oder Ausbau der Infrastruktur. Dazu gehören für batterieelektrische Antriebe insbesondere Stromnetzausbau und Stromspeicherbau, für Antriebe, die mit E-Fuels angetrieben werden, insbesondere der Bau der Konvertierungsanlagen. Derzeit ist die Datenlage hier noch sehr lückenhaft. Grund für die spärliche Datenlage ist u.a. die schwierige Zuteilung der durch den Infrastrukturausbau verursachten Emissionen auf einzelne Endanwendungen. Wegen dieser Schwierigkeit lässt das Gros der LCA-Studien diesen Lebenszyklusabschnitt aus (vgl. Frontier Economics (2020)).

2. Wird Vielfalt der Anwendungsfälle im Individualverkehr berücksichtigt?

Bei diesem Untersuchungskriterium steht die Frage im Zentrum, wie viele Fahrzeugklassen und welche repräsentativen Fahrzeuge in den Studien betrachtet werden. Die Berücksichtigung unterschiedlicher Fahrzeugklassen ist angebracht, da

- die **Anwendungsvielfalt** im Individualverkehr sehr groß ist, d.h. die Bedarfe und Präferenzen der Verbraucher sind sehr unterschiedlich; und
- sich gleichzeitig **signifikante Unterschiede in den Ergebnissen** zeigen, wenn die Fahrzeugklasse variiert wird.

Abbildung 6 zeigt welche Fahrzeugklassen in den jeweiligen Studien berücksichtigt werden. Hierbei ergibt sich folgendes Bild:

- **Frontier und Fraunhofer sind die einzigen Studien, die mehr als eine Fahrzeugklasse betrachten.** Beide Studien betrachten drei verschiedene Pkw-Klassen, Frontier zusätzlich noch das Segment der leichten Nutzfahrzeuge.
- **In den meisten Fällen wird als Referenz die Kompaktklasse herangezogen.** Die Wahl dieser Fahrzeugklasse könnte darin begründet sein, dass es in diesem Segment die meisten auf dem Markt erhältlichen Elektrofahrzeugmodelle gibt. Zudem zählen Kompaktfahrzeuge zu den zahlenmäßig am meisten verkauften Fahrzeugklassen in Deutschland. Bei den Neuzulassungen machte sie 2019 mit 20,5% den zweitgrößten Anteil aus. Den größten Anteil hatten jedoch mit 21,1%⁷ SUV (Sports Utility Vehicles), die neben Frontier nur von Fraunhofer und ifo⁸ betrachtet werden.

⁷ Vgl. KBA, https://www.kba.de/DE/Statistik/Fahrzeuge/Neuzulassungen/n_jahresbilanz.html.

⁸ Im Fall der Studie des ifo-Institutes werden Fahrzeuge der Oberklasse gegenübergestellt. Da Oberklasse und SUV in etwa ähnliche technische Parameter aufweisen (z.B. Batteriekapazität bei BEV), fassen wir die Klassen in diesem Bericht zusammen.

Abbildung 6. Lediglich Frontier und Fraunhofer betrachten mehr als eine Fahrzeugklasse

	Kleinwagen	Kompaktklasse	Mittelklasse	Oberklasse/ SUV	Leichte Nutzfahrzeuge
Zapf et al.	✗	✓	✗	✗	✗
Agora Dezember	✗	✓	✗	✗	✗
Frontier	✗	✓	✓	✓	✓
Joanneum	✗	✓	✗	✗	✗
Agora April	✗	✓	✗	✗	✗
ifo	✗	✗	✗	✓	✗
Fraunhofer	✓	✗	✓	✓	✗
FfE	✗	✓	✗	✗	✗

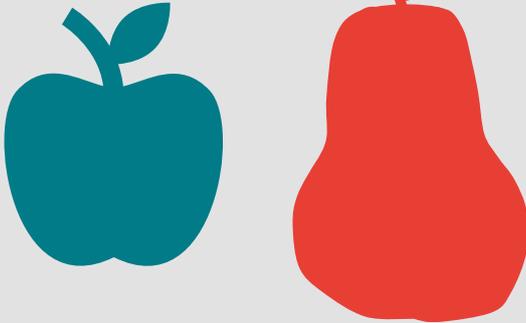
Quelle: Frontier Economics

3. Ist die Vergleichbarkeit zwischen den Technologien gegeben, ist der Vergleich also „fair“?

Hier überprüfen wir, ob der Technologienvergleich innerhalb der jeweiligen Studien angemessen und fair vorgenommen wird.

ANGEMESSENE VERGLEICHBARKEIT DER TECHNOLOGIEN FÜR EINE VERGLEICHSANALYSE

Bei Vergleichsanalysen sollte grundsätzlich sichergestellt werden, dass nicht **Äpfel** mit **Birnen** verglichen werden, sondern Vergleichsobjekte standardisiert und vergleichbar gemacht werden. Vergleichbar sollten Vergleichsobjekte insbes. aus der Anwenderperspektive sein, also denselben Anwendungsnutzen (wie Mobilitätsservice und Komfort) bereitstellen. Vor dem Hintergrund der Vielfalt der Anwendungsfälle und Technologien im Individualverkehr ist Vergleichbarkeit in diesem Kontext jedoch kein direkt eindeutiger Begriff. Die verschiedenen Antriebstechnologien weisen nämlich grundlegend unterschiedliche Charakteristika und demnach Vor- und Nachteile auf. Beispiele sind:



- ✓ **Fahrzeugklassen (Transportkapazität und -standard):** Werden mit den zu vergleichenden Fahrzeugen dieselben Präferenzen bezüglich der Größe, Form und Fahrzeugausstattung (Fahrzeugklasse) bedient? Da es viele Fahrzeugmodelle unterschiedlicher Antriebstechnologien gibt, die derselben Fahrzeugklasse zugeordnet werden können, sollten bei einer Vergleichsanalyse auch vergleichbare Fahrzeugklassen hinzugezogen werden.
- ✗ **Wegzeit/Reichweite:** Sind die Fahrzeuge in der Lage, eine gegebene Mobilitätsanforderung in derselben Zeit über dieselbe Strecke zu erfüllen? Hier gibt es signifikante Unterschiede zwischen den Technologien. Insbesondere BEV haben relativ zu FCEV oder ICEV nicht nur eine deutlich geringere Reichweite, auch die Lade-/Tankdauer beträgt in der Regel ein Vielfaches der Zeit, wodurch sich die Wegzeit deutlich verlängern kann. Deswegen können mit BEV Strecken ab einer gewissen Länge nicht in derselben Zeit zurückgelegt werden wie mit Vergleichstechnologien. Um mit einem bestimmten BEV-Modell eine längere Strecke ohne Ladepause zurücklegen zu können, müsste eine größere Batterie verbaut werden. Agora (Studie aus dem Dezember) analysiert diesbezüglich ein Szenario mit einem Kompaktklassewagen mit einer größeren, 60 kWh fassenden, Batterie. Aber auch größere Batterien und Schnellladesäulen kommen derzeit noch an technologische Grenzen und sind bezüglich Reichweite und Wegzeit nicht vergleichbar mit anderen Technologien.
- ✗ **Andere Nutzungsfaktoren wie Fahrgeräusche oder lokale Abgase:** Für ein positives Fahrgefühl können Faktoren wie bspw. verringerte Motorgeräusche und ausbleibende lokale Abgase des Elektromotors sorgen, der in BEV verbaut ist. Letztendlich sind dies Eigenschaften, die beim ICEV weiter verbessert werden können, aber an einem bestimmten Punkt an technische Grenzen stoßen werden.
- ✗ **Kosten (Kaufpreis, Reparatur und Energiekosten):** Erhalten Nutzer für einen bestimmten Geldbetrag vergleichbare Fahrzeuge/vergleichbaren Mobilitätsnutzen? Die Kosten für FCEV und BEV sind derzeit (noch) signifikant höher als für ICEV und deswegen kann keine Kostenstandardisierung vorgenommen werden.

Es stellt sich also die Frage, bei welchen Aspekten durch Standardisierung Vergleichbarkeit hergestellt werden kann und bei welchen Aspekten eine gewisse Ungenauigkeit bestehen bleiben muss. **Wir definieren im Folgenden Fahrzeuge dann als vergleichbar**, wenn die grundsätzliche **Fahrzeugklasse** über kurze Strecken dieselbe ist. Bei den anderen Aspekten kann keine Vergleichbarkeit hergestellt werden, weil die Technologien per se zu unterschiedliche Charakteristika haben.

Abbildung 7. Der Vergleich zw. Fahrzeugen mit unterschiedlichen Antrieben ist in der Regel „fair“

	Verglichene Fahrzeugauslegungen
Zapf et al.	Referenzfahrzeuge und davon abgeleitete Standardfahrzeuge
Agora Dezember	Generisch
Frontier	Generisch
Joanneum	Generisch
Agora April	Generisch
ifo	Mercedes C 220 d vs. Tesla Model 3
Fraunhofer	Generisch
FfE	Generisch

Quelle: Frontier Economics

Für einen aussagekräftigen Vergleich von Antriebstechnologien ist es essenziell, dass die Vergleichbarkeit der Fahrzeuge zumindest zu einem Mindestmaß gewährleistet ist, d.h. dass zwei vergleichbare Fahrzeuge derselben Fahrzeugkategorie analysiert werden (z.B. zwei Kompaktklassenfahrzeuge). In einigen Studien wurden in der Vergangenheit unterschiedliche Fahrzeugklassen für eine Vergleichsanalyse herangezogen. Dies lag darin begründet, dass es keine Fahrzeugklasse gab, in der alle technisch verfügbaren Antriebstechnologien vertreten waren. Mit der stetig zunehmenden Zahl an z.B. batterieelektrischen oder mit Brennstoffzelle angetriebenen Fahrzeugmodellen wird es jedoch zunehmend leichter, vergleichbare Fahrzeugauslegungen zu finden.

Unsere Auswertung hat ergeben, dass die Vergleichbarkeit der Fahrzeugauslegung bei den untersuchten Studien, die durchgehend aus der jüngeren Vergangenheit stammen, gegeben ist.

Es kann des Weiteren zwischen einer spezifischen und einer generischen Fahrzeugauslegung unterschieden werden (vgl. Abbildung 7). Das ifo-Institut analysiert zwei spezifische Fahrzeugmodelle. Diese Herangehensweise hat den Vorteil einer exakten CO₂-Bewertung für die jeweils betrachteten Fahrzeuge, hat allerdings den Nachteil, dass das Ergebnis weniger repräsentativ ist. Zapf et al. beziehen sich zunächst ebenfalls auf spezifische Fahrzeugmodelle, standardisieren diese dann jedoch durch Angleichung bestimmter Fahrzeugkomponenten (bspw. der Karosserie), um eine bessere Vergleichbarkeit zu erzielen. Die übrigen Studien betrachten und modellieren von vornherein einzelne („generische“) Fahrzeugkomponenten. Der Vorteil dieses Ansatzes ist, dass innerhalb bestimmter Anwendungsfälle die Fahrzeugkomponenten relativ repräsentativ sind. Technologieübergreifend vergleichbare Komponenten gehen identisch in die Analyse ein, unterschiedliche Komponenten wie Dieseltank und Batterie fließen dagegen entsprechend mit technologiespezifischen CO₂-Emissionen in die Analyse ein.

4. Welche der Antriebstechnologien werden berücksichtigt?

Die Diversität der Analysen ergibt sich u.a. durch die Anzahl und Vielfalt der analysierten Antriebstechnologien,

- ausgehend von den **derzeit auf dem deutschen und globalen Markt** weit verbreiteten Technologien wie Diesel ICEV und Benzin ICEV,
- bis hin zu **neueren Technologien mit aus Sicht der Studienautoren ansteigenden Marktanteilen**, vor allem bei

VERGLEICH VON STUDIEN ZUR CO₂-GESAMTBILANZ FÜR ANTRIEBSTECHNOLOGIEN IM INDIVIDUALVERKEHR

den derzeit politisch stark geförderten BEV und Hybridvarianten, ferner auch Erdgas ICEV oder Brennstoffzellen-Fahrzeugen (FCEV).

Zudem unterscheiden sich die Studien bezüglich der Erfassung zukünftiger Entwicklungen bei der **Antriebsenergie selbst bzw. den Kraftstoffen**, wie z.B.

- die zunehmende Verwendung von „**grünem**“ **Ladestrom** bei BEV,
- die aus Erneuerbaren Energien hergestellten, **synthetischen**, „**grünen**“ **Kraftstoffe** bei ICEV.

Da heute nicht bekannt ist, welche Technologien sich auf lange Sicht aus technischer, ökonomischer und ökologischer Perspektive für welche Zwecke als am vorteilhaftesten erweisen und zudem die Anwendungsfälle und Bedarfe bei den Kunden sehr unterschiedlich sind, ist es sinnvoll, in den Studien eher eine größere Anzahl an Technologien zu analysieren.⁹

Die Anzahl der untersuchten Technologien variiert stark zwischen den Studien (vgl. Abbildung 8).

- Die **meisten Technologien** werden von Zapf et al. und Joanneum berücksichtigt. Diese Autoren analysieren nicht nur verschiedenste Antriebsysteme, sondern auch verschiedene Zusammensetzungen der Antriebsenergien.
- Aus **Erneuerbaren Energien hergestellte synthetische Kraftstoffe**, die wegen der Transportfähigkeit aus Regionen mit hohem und günstigem EE-Vorkommen importiert werden können, berücksichtigt außer Zapf et al. und dem Joanneum nur Frontier Economics.¹⁰ Im Frontier LCA-Berechnungstool lassen sich zudem beliebige Beimischungsverhältnisse entsprechend eines denkbaren Markthochlaufes von synthetischen Kraftstoffen modellieren.
- Mit **grünem Strom angetriebene BEV** analysieren zusätzlich zu Zapf et al. und Joanneum auch Frontier, Agora (Studie vom April 2019), Fraunhofer und FfE.
- Weitere Antriebstechnologien wie **FCEV und CNG** werden neben Zapf et al. und dem Joanneum von Agora (Studie vom Dezember 2019) (beide Technologien) und vom ifo (CNG) berücksichtigt.

⁹ Das Vergleichskriterium untersucht die Technologiebreite, nicht die Analysetiefe der jeweiligen Technologien.

¹⁰ Agora Dezember analysiert zwar auch synthetische Kraftstoffe, allerdings hergestellt aus deutschem Strom, der vergleichsweise CO₂-intensiv und auf absehbare Zeit nicht „grün“ sein wird.

Abbildung 8. Zapf et al. und Joanneum Research analysieren die meisten Technologien

	Diesel	Diesel grün	Benzin	Benzin grün	BEV mix	BEV grün	FCEV	FCEV grün	Weitere
Zapf et al.	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	CNG PHEV HEV
Agora Dezember	✓	✗	✓	✗	✓	✗	✓	✗	CNG, nicht-erneuerbare synth. Kraftstoffe
Frontier	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✗	✗	✗
Joanneum	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	CNG PHEV HEV
Agora April	✓	✗	✓	✗	✓	✓	✗	✗	✗
ifo	✓	✗	✗	✗	✓	✗	✗	✗	CNG
Fraunhofer	✓	✗	✓	✗	✓	✓	✗	✗	✗
FfE	✗	✗	✓	✗	✓	✓	✗	✗	✗

Quelle: Frontier Economics

5. Welche Länder und entsprechend CO₂-Intensitäten decken die Studien ab?

Ein Großteil der CO₂-Gesamtbilanz von BEV ist standortabhängig. Die Zusammensetzung der Energie in einer Region, insbesondere des Stroms, die für die Prozesse der einzelnen Lebenszyklusstufen verwendet wird, beeinflusst die CO₂-Bilanz der Technologie maßgeblich. Abhängig vom Land, in dem das Fahrzeug oder die Antriebsenergie hergestellt wird, unterscheidet sich dementsprechend die CO₂-Bilanz der jeweiligen Lebenszyklusstufen. Es ist deshalb relevant, welche Fahrzeugherstellungs- und Fahrzeugnutzungsländer und welche damit verbundenen CO₂-Intensitäten der aufgewendeten Energie in den Studien berücksichtigt werden.

Bei Durchsicht der Studien lässt sich feststellen (Abbildung 9), dass

- nicht alle Studien bezüglich der regionalen Zuordnung der Herstellung von Fahrzeugkomponenten und der damit einhergehenden CO₂-Intensitäten der Energieträger transparent sind, aber

VERGLEICH VON STUDIEN ZUR CO₂-GESAMTBILANZ FÜR ANTRIEBSTECHNOLOGIEN IM INDIVIDUALVERKEHR

- alle Studien den Herstellungsort der Batterie von dem des restlichen Fahrzeugs unterscheiden. Damit tragen sie der Sonderstellung der energieintensiven Batterieherstellung Rechnung.

Abbildung 9. Entscheidende standortabhängige Einflussfaktoren sind nicht bei allen Studien ersichtlich

	Herstellung Fahrzeug	Herstellung Batterie	Nutzung
Zapf et al.	D	unklar (Modellierung durch die Autoren)	D
Agora Dezember	D	International (siehe Agora April)	D
Frontier	D	EU USA China Japan	D EU
Joanneum	unklar (Energiebedarf modelliert nach VW-Werksangaben)	International (nach fest definierten Anteilen für die drei Zeitpunkte)	D EU Diverse
Agora April	D	International (Strommixe der heutigen Produktionsländer entsprechend ihrem Marktanteil an der Fertigung)	D EU
ifo	unklar (Zahlen aus ifeu-Studie 2011)	unklar (durchschnittliche Batterieherstellungsemissionen)	D
Fraunhofer	unklar (Verweis auf Zahlen des ADAC von 2018)	unklar (durchschnittliche Batterieherstellungsemissionen)	D
FfE	D	International (nach tatsächlichem Anteil der batteriefertigenden Regionen)	D EU

Quelle: *Frontier Economics*

6. Welchen Zeitrahmen deckt die Analyse ab, und werden dynamische Entwicklungen berücksichtigt?

Es ist für die Studienergebnisse relevant, ob diese die CO₂-Bilanz

- ...**statisch** analysieren: Bei der statischen Analyse werden die zum Zeitpunkt der Fahrzeugherstellung bzw. Inbetriebnahme vorliegenden Einflussfaktoren und Rahmenbedingungen als unverändert über die gesamte Lebensdauer des Fahrzeuges

angenommen. Dies betrifft zum Beispiel die CO₂-Intensität des Ladestroms; oder

- ...**dynamisch** analysieren: Im dynamischen Fall werden für Einflussparameter und Rahmenbedingungen mögliche Veränderungen berücksichtigt, die während der Lebensdauer des betrachteten Fahrzeuges eintreten können.

Für eine statische Analyse spricht, dass keine Zukunftsprognosen nötig sind: Vor dem Hintergrund der Unsicherheit bezüglich zukünftiger Entwicklungen wird der Status Quo als bester Schätzer herangezogen. Allerdings zeigt nur eine dynamische Analyse die Potenziale der verschiedenen Technologien über den Zeitablauf und unter Berücksichtigung zukünftig zu erwartender Entwicklungen (z.B. bezüglich des Energiemix) auf.

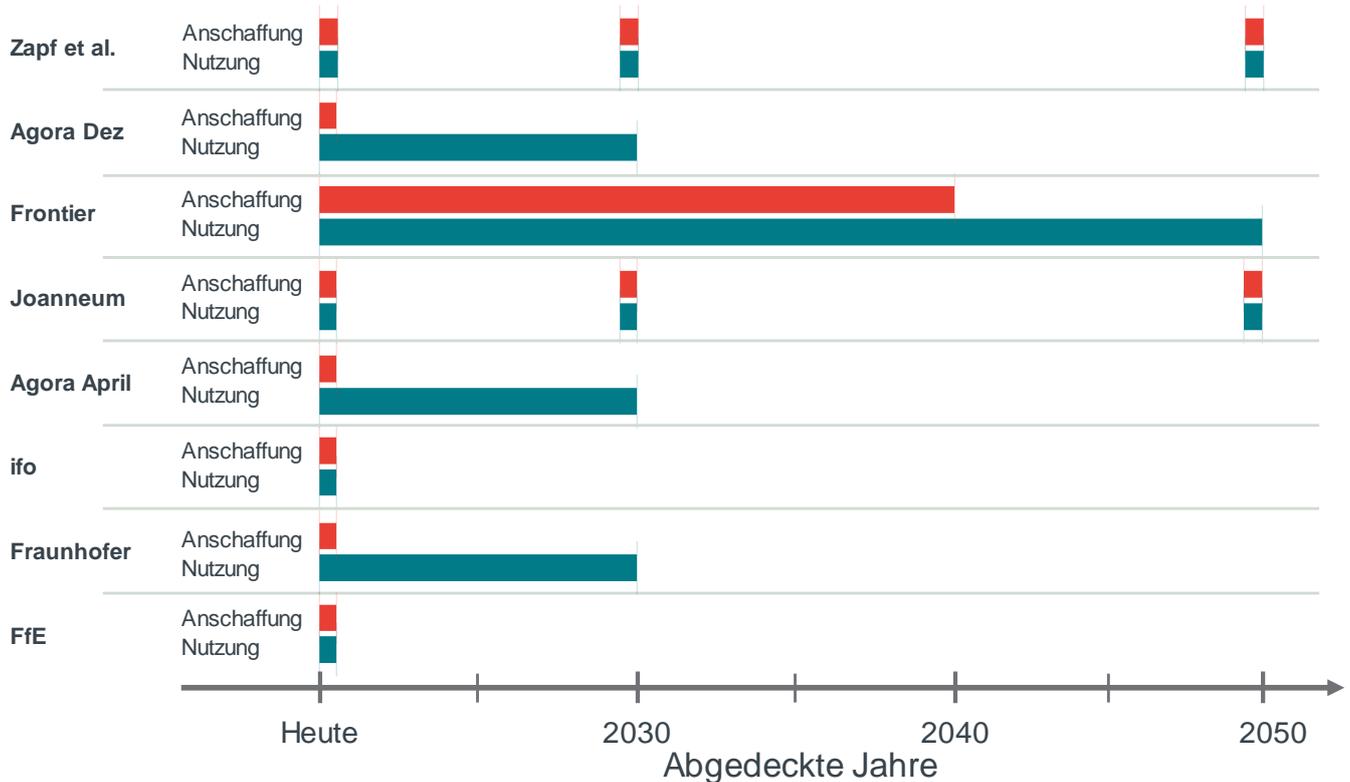
Die Durchsicht der untersuchten Studien zeigt folgendes Bild (Abbildung 10):

- Die Herangehensweise von FfE und ifo reflektiert einen **statischen Ansatz**. Die Studien analysieren die CO₂-Gesamtbilanz für ein Fahrzeug, das heute hergestellt wird und über die Lebensdauer mit dem heutigen Energiemix angetrieben wird. Die CO₂-Intensität des Energiebedarfs für die Herstellung des Fahrzeugs wie für die gesamte Nutzungsphase entspricht dem heutigen Stand.
- Einen **dynamischen Ansatz bzgl. der Nutzungsphase** wählen die Analysen von Agora (April & Dezember 2019) und Fraunhofer. Diese Studien analysieren zwar ebenfalls die CO₂-Gesamtbilanz eines Fahrzeugs, das heute hergestellt wird, allerdings ist der Ansatz insofern dynamisch, als dass der Strommix über den Lebenszeitraum bis 2030 stetig „grüner“ wird.
- Ein **dynamischer Herstellungsansatz** wird von Joanneum und Zapf et al. verfolgt. Die Studien blicken weiter in die Zukunft und modellieren die CO₂-Gesamtbilanz für Fahrzeuge, die **heute, 2030** und **2050** hergestellt werden. Die CO₂-Intensität des Ladestroms verbleibt jedoch statisch auf dem Niveau des Herstellungsjahres.
- Einen **dynamischen Ansatz sowohl bei Herstellung des Fahrzeugs als auch dessen Nutzung** wendet Frontier Economics an. Die Studie modelliert die CO₂-Gesamtbilanz für Fahrzeuge, die in den Jahren von **2020 bis 2040** hergestellt bzw. in Betrieb genommen werden und dann zum Beispiel 10 Jahre¹¹ genutzt werden (also z.B. für Fahrzeuge mit Baujahr 2040 entsprechend bis einschließlich 2050). Der Ladestrom wird dabei dynamisch über die Lebensdauer in drei verschiedenen Szenarien „grüner“. Beimischungsanteile von synthetischen

¹¹ Grundsätzlich ist die Wahl der Lebensdauer und -fahrleistung flexibel einstellbar, wobei 2050 das letztmögliche Nutzungsjahr darstellt.

Kraftstoffen können variabel gewählt werden. Das Modell bietet allerdings auch die Flexibilität, **ein statisches** Szenario für jedes beliebige Herstellungsjahr zu berechnen, in dem der Ladestrom die CO₂-Intensität des Herstellungsjahres über das ganze Fahrzeugleben aufweist.

Abbildung 10. Zeitliche Dynamik bei Frontier Economics am stärksten ausgeprägt



Quelle: Frontier Economics

Die resultierenden CO₂-Bilanzen zeigen kein einheitliches Bild bezüglich der Vorteilhaftigkeit von Technologien

Im Folgenden betrachten wir die resultierenden CO₂-Gesamtbilanzen der unterschiedlichen Studien für ICEV und BEV (Abbildung 11). Auf der x-Achse sind die jeweiligen Studien abgebildet, auf der y-Achse die Bandbreiten der Berechnungsergebnisse für die Lebenszyklus-Emissionen für die unterschiedlichen Fahrzeugtechnologien (g(CO₂)/km). Die Studien sind von links nach rechts aufsteigend anhand der minimalen CO₂-Gesamtbilanz der ICEV angeordnet. Die grünen Balken stellen die CO₂-Emissionen für ICEV dar, die roten Balken entsprechend die Ergebnisse für BEV. Die Obergrenze eines Balkens wird durch die CO₂-Bilanz des pessimistischsten Szenarios der jeweiligen Technologie bestimmt, die Untergrenze durch die CO₂-Bilanz des optimistischsten/am weitesten in der Zukunft liegenden Szenarios.

VERGLEICH VON STUDIEN ZUR CO₂-GESAMTBILANZ FÜR ANTRIEBSTECHNOLOGIEN IM INDIVIDUALVERKEHR

Alle Ergebnisse sind auf eine Lebensfahrleistung von 150.000 km standardisiert.

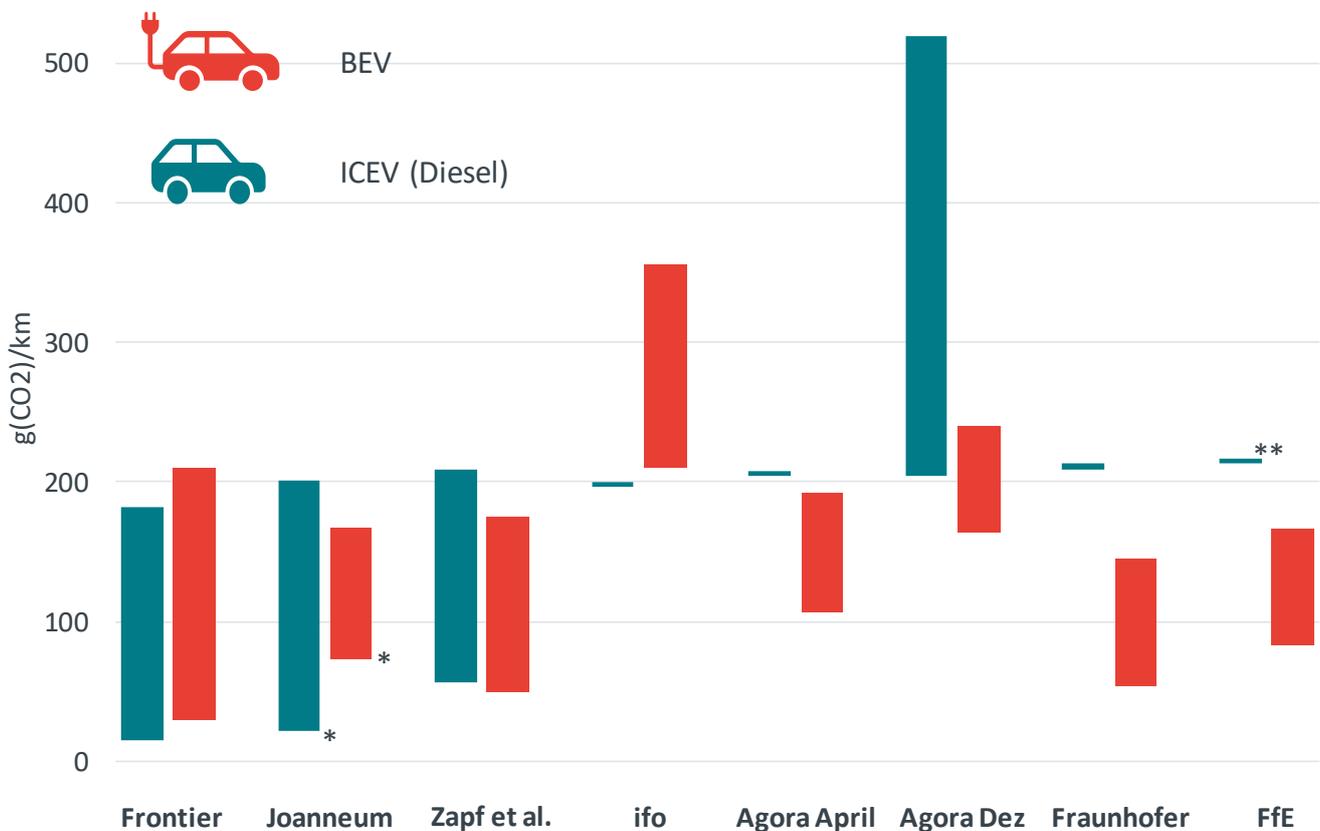
Es zeigt sich folgendes Bild:

- **Die CO₂-Gesamtbilanz der Technologien variiert zum Teil deutlich über die Studien hinweg:** Ein einheitliches Ergebnis kann weder für die Ober- noch die Untergrenzen der CO₂-Emissionen festgestellt werden. Es zeigen sich allerdings auch Überschneidungen in den Ergebnissen einzelner Studien.
- **Manche Studien analysieren für eine Technologie mehr Szenarien als andere, so dass es innerhalb jener Studien zu unterschiedlich großen Bandbreiten in den Ergebnissen kommt:** ifo, Agora (April 2019), Fraunhofer und FfE betrachten mehrere (auch perspektivische) Anwendungsfälle für das BEV, allerdings nur den Status Quo für ICEV. Für das BEV ergeben sich somit Bandbreiten in den Schätzungen, für das ICEV Punktschätzer.
- **Die Bandbreiten der CO₂-Gesamtbilanz für BEV** sind getrieben durch
 - die CO₂-Intensität des Ladestroms: Die CO₂-Gesamtbilanz wird z.B. reduziert, wenn unterstellt wird, dass Fahrzeuge
 - durchschnittlich den europäischen statt den deutschen Strommix laden (vgl. Kriterium 5).
 - den zukünftig „grüneren“ Strommix laden (vgl. Kriterium 6), wenn also Zukunftsszenarien modelliert werden, in denen der Ladestrom zu einem höheren Anteil aus Erneuerbaren Energien hergestellt wird (vgl. z.B. Frontier, Agora) bzw. wenn 100% „grüner“ Ladestrom angenommen wird (vgl. Fraunhofer).
 - Dagegen ist die vom ifo-Institut geschätzte CO₂-Gesamtbilanz auffällig hoch. Treiber sind hier zum einen die Annahme, dass der heutige deutsche Ladestrom (mit der entsprechenden CO₂-Intensität) statisch für die gesamte Lebensfahrleistung genutzt wird (vgl. Kriterium 6), zum anderen die Wahl einer größeren Fahrzeugklasse (vgl. Kriterium 2), die einen höheren Stromverbrauch während der Fahrzeugnutzung zur Folge hat.
 - unterschiedlich große Batteriekapazitäten; sowie
 - den Herstellungsort der Batterie (vgl. Kriterium 5).
- **Die Bandbreiten der Gesamtbilanzen für ICEV** sind u.a. getrieben durch Annahmen bezüglich des zukünftigen Einsatzes von „grünen“ synthetischen Kraftstoffen.
 - Bei Frontier, Joanneum und Zapf et al. führt der Einsatz von „grünem“ synthetischem Diesel zu signifikanten CO₂-Einsparungen.
 - Bei Agora (Dezember 2019) dagegen treibt der Einsatz von synthetischen Brennstoffen die CO₂-Emissionen auf über

VERGLEICH VON STUDIEN ZUR CO₂-GESAMTBILANZ FÜR ANTRIEBSTECHNOLOGIEN IM INDIVIDUALVERKEHR

500 g(CO₂)/km. Dies ist darauf zurückzuführen, dass hier angenommen wird, dass der synthetische Diesel unter Einsatz des deutschen, relativ CO₂-intensiven Strommixes der Jahre 2018 bis 2030 hergestellt wird. Dagegen nehmen die anderen oben genannten Studien an, dass grüner synthetischer Kraftstoff aus Erneuerbaren Energien zunehmend eingesetzt wird, der an vorteilhaften Standorten im Ausland günstig hergestellt, nach Deutschland transportiert und mittels heutiger Infrastrukturen für die Nutzung bereitgestellt werden kann.

Abbildung 11. Kein einheitliches Bild - Niveau der CO₂-Emissionen und Bandbreiten der Studienergebnisse unterscheiden sich zum Teil deutlich



Quelle: Frontier Economics auf Basis der untersuchten Studien

Hinweis: Die Studien sind von links nach rechts aufsteigend anhand der minimalen CO₂-Gesamtemissionen innerhalb der ICEV Diesel Kategorie geordnet.

* Für die Joanneum Studie konnte eine Skalierung der prognostizierten Werte für das Jahr 2050 auf eine Fahrleistung von 150.000 km nur annäherungsweise vorgenommen werden, da die Studie die Ergebnisse der einzelnen Lebenszyklusabschnitte nicht transparent ausweist. Daher wurde an dieser Stelle auf Anteile an den Gesamtemissionen aus der ADAC-Publikation zurückgegriffen, die auf der Joanneum Studie basiert.

** Die FfE-Studie analysiert neben einem BEV lediglich die CO₂-Emissionsbilanz eines Benzin-Fahrzeugs. Ein ansonsten gleichwertiges Fahrzeug mit Diesel-Verbrennungsmotor würde entsprechend eine etwas geringere Emissionsbilanz aufweisen.

Je breiter der Analyserahmen, desto vielfältiger bzw. ausgeglichener die CO₂-Bilanzen der einzelnen Technologien

In diesem Kapitel ordnen wir die Erkenntnisse aus dem Studienvergleich ein. Insbesondere sehen wir einen Zusammenhang zwischen der in den Studien angewandten Untersuchungsmethodik einerseits und den Studienergebnissen andererseits (Abbildung 12):

- Anhand der Vergleichskriterien leiten wir schematisch die **Breite bzw. Enge des Analyserahmens** her (vertikale Positionierung der Studien, y-Achse der Abbildung 12).¹²
- Anhand der Studienergebnisse ordnen wir die aus den **CO₂-Bilanzen** resultierenden Vorteilhaftigkeiten der einzelnen Antriebstechnologien ein (horizontale Positionierung, x-Achse). Weisen die Ergebnisse eine Vorteilhaftigkeit von ICEV gegenüber BEV aus, erfolgt die Einordnung schematisch auf der rechten Seite der Grafik. Ergibt sich aus den Ergebnissen einer Studie keine eindeutige Vorteilhaftigkeit einer Technologie, erfolgt eine Einordnung mittig, bei Vorteilhaftigkeit von BEV im linken Bereich. Die Einordnung der Studien entlang der X-Achse erfolgt hierbei anhand der beobachteten Überschneidungsbereiche bei den Bandbreiten für die CO₂-Bilanzen für BEV vs. ICEV in den jeweiligen Studien (Abbildung 11).

Auf dieser Basis ergibt sich eine Matrix mit den Skalen „Breite der Analyse“ und „Ergebnisvielfalt“ (Abbildung 12). Es lässt sich Folgendes feststellen:

- **„Breite“ vs. „enge“ Analysen:** Je breiter LCA-Analysen angelegt sind, desto vielfältiger bzw. ausgeglichener sind die Gesamtergebnisse: Werden z.B. mehrere unterschiedliche Anwendungsfälle betrachtet, kommt es auf den jeweiligen Einzelfall an, welche Technologie vorteilhaft ist. Je enger dagegen Anwendungsfälle betrachtet werden und je fallspezifischere Annahmen getroffen werden, desto eher erscheint im jeweiligen Fall die Vorteilhaftigkeit einer einzelnen Technologie (BEV oder ICEV). Über alle Studien hinweg bleibt also festzuhalten, dass Technologien in bestimmten Anwendungsfällen Vorteile aufweisen, allerdings keine Technologie generell überlegen ist.
- Auf dieser Basis lassen sich die Studien grob in drei **Gruppen** unterteilen:
 - Die Studien, die einen eher breiten Analyseansatz wählen, kommen zu vielfältigen Ergebnissen bezüglich der

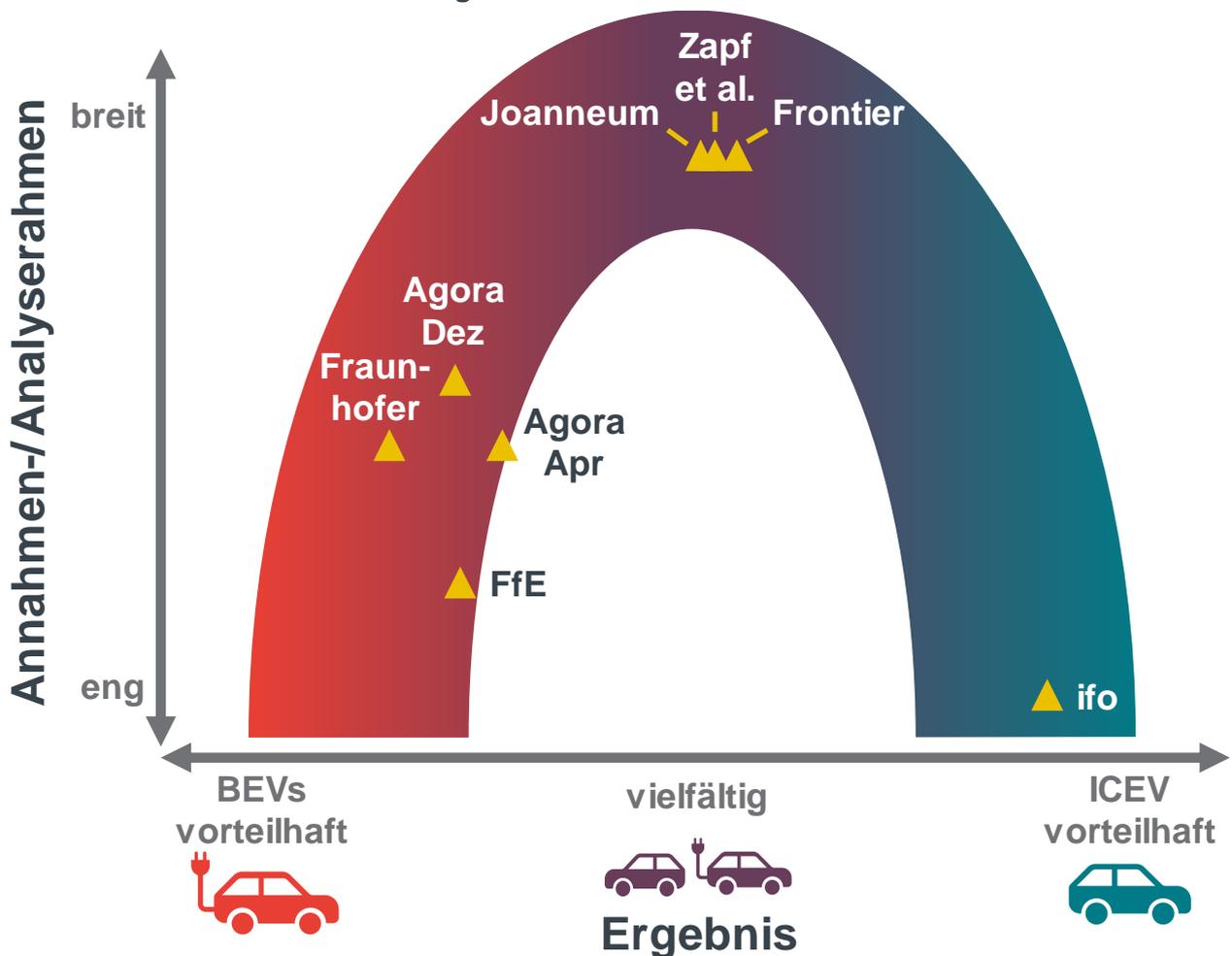
¹² Die Detailinformationen sind in den oben aufgeführten Kapiteln zu den jeweiligen Vergleichskriterien enthalten.

VERGLEICH VON STUDIEN ZUR CO₂-GESAMTBILANZ FÜR ANTRIEBSTECHNOLOGIEN IM INDIVIDUALVERKEHR

klimabilanziellen Vorteilhaftigkeit von Antriebssystemen. Hierzu gehören Frontier, Zapf et al. und Joanneum.

- Eine zweite Gruppe an Studien weist eine mittlere Breite bei der Herangehensweise auf, allerdings in deutlich geringerem Maßstab als die oben genannten Studien. Diese Gruppe weist tendenziell eher die Vorteilhaftigkeit von BEV aus. Hierzu gehören die beiden Agora Studien, Fraunhofer und FfE.
- Einen noch engeren Fokus setzt das ifo-Institut mit seiner Lebenszyklusanalyse. Hier weisen die Ergebnisse eine starke Vorteilhaftigkeit der ICEV auf.

Abbildung 12 Je breiter der Analyserahmen, desto ausgeglichener die CO₂-Bilanzen der einzelnen Technologien



Quelle: Frontier Economics

Hinweis: Diese Einordnung erhebt keinen Anspruch auf Allgemeingültigkeit und beruht auf Einschätzungen der Autoren.

Weitere Hinweise zur Einordnung der Studien finden sich im Anhang.

5. FAZIT UND SCHLUSSFOLGERUNGEN

Aus den in dieser Kurzstudie vorgenommene Auswertung leiten wir folgende Erkenntnisse ab.

Technologien sollten ganzheitlich daran gemessen werden, wie sparsam sie relativ zu anderen Technologien mit dem CO₂-Budget umgehen



Jede Technologie muss bzgl. ihrer CO₂-Bilanz **ganzheitlich** betrachtet werden.

Es darf nur noch eine Restmenge (Budget) an 420 bis 580 Gt CO₂-Äquivalenten in die Atmosphäre emittiert werden, wenn die Klimaerwärmung auf 2° C - und möglichst 1.5° C - gegenüber dem vorindustriellen Niveau begrenzt bleiben soll. Vor diesem Hintergrund sollte eine Technologie - das gilt auch für Antriebstechnologien im Individualverkehr - daran gemessen werden, wie sparsam sie relativ zu anderen Technologien, die den gleichen Anwendungsnutzen haben, mit CO₂-Budgets über den Lebenszyklus umgeht. Diese Erfassung der CO₂-Emissionen muss hierbei gesamtheitlich über den Lebenszyklus durchgeführt werden: Lebenszyklusanalysen stellen damit die geeignete Methodik dar, Antriebstechnologien gesamtheitlich hinsichtlich ihrer tatsächlichen CO₂-Bilanz zu bewerten, unabhängig von Ort, Sektor oder Jahr, in dem die CO₂-Emissionen verursacht werden.

Derzeitige Klimaschutzmaßnahmen berücksichtigen jedoch CO₂-Emissionen nicht gesamtheitlich, sondern auf einzelne Länder, Sektoren und Stichjahre fokussiert. Die fehlende gesamtheitliche Perspektive ist kontraproduktiv für das Erreichen der Klimaschutzziele.

Lebenszyklusanalysen sind essenziell, dürfen aber nicht fehlinterpretiert werden

Der **Individualverkehr bietet** durch die Vielzahl an Anwendungsfällen einen **großen Analysespielraum**. In der Realität existieren nicht nur sehr unterschiedliche Fahrzeugtypen und -klassen, sondern eine Vielzahl weiterer essenzieller Faktoren wie unterschiedliche Herstellungsverfahren und -standorte für die Fahrzeuge und für deren Komponenten, Fahrverhalten, Nutzungsdauern usw. Zudem gibt es weitere Faktoren, die sich im Laufe des Lebenszyklus einer Technologie verändern können wie beispielsweise die Kraftstoffzusammensetzung oder die CO₂-Intensität des Ladestroms.



Es gibt **nicht die „Eine“ Technologie**, die in allen Anwendungsfällen **vorteilhaft** ist. Es kommt auf den Einzelfall an.



Ergebnisse müssen vor dem Hintergrund der **Vielfalt im individuellen Straßenverkehr** interpretiert werden.

Dieser Vielfalt von Rahmenbedingungen, Bedarfen und Zukunftsszenarien sollte in Lebenszyklusanalysen zu CO₂-Emissionen von Antriebstechnologien sowie der Interpretation der Studienergebnisse Rechnung getragen werden.

Studien mit breitem Analysespektrum deuten auf Vorteilhaftigkeit von Technologievielfalt hin

Die resultierenden CO₂-Bilanzen sind abhängig vom Analysefokus sehr unterschiedlich. Tendenziell zeigt sich, dass

- ...**Studien** mit einem **engeren Analysespektrum** dazu tendieren, die **alleinige Vorteilhaftigkeit** einzelner Technologien auszuweisen.
- ...die **Studien, die eine größere Vielfalt abbilden**, zu neutraleren Vergleichsergebnissen kommen.
- ...es unabhängig über alle Studien hinweg **keine Technologie** gibt, die **übergreifend allein vorteilhaft** ist. Vielmehr kommt es auf den Einzelfall an.

Die Politik muss daher die Weichen für eine ganzheitliche und technologieoffene Klimapolitik im Verkehrssektor stellen

Die Analyse zeigt, dass einer verkehrs- und energiepolitischen Strategie eine ganzheitliche LCA-Perspektive nicht durch sektorspezifische und nationale Politikmaßnahmen untergraben werden sollte und Anreize zu vermeiden sind, Emissionen in andere Sektoren, Geographien oder Jahre zu verschieben. Allerdings sind die Weichen für einen offenen und zukunftsorientierten Politik- und Regularienansatz noch nicht gestellt. Die folgenden Schritte sind hierfür erforderlich:

- Technologien müssen konsequent anhand der Vogelperspektive („Cradle-to-Grave“), nicht der Froschperspektive („Tank-to-Wheel“), bewertet werden.
- Kein Fokus auf nur eine Technologie – die Klimapolitik muss einen zielkonformen Technologiemarkt ermöglichen und fördern.
- Es sind regulatorisch faire und offene Rahmenbedingungen zu gewährleisten.
- Die Verkehrs- und Klimapolitik muss global gedacht werden – eine Fokussierung allein auf Deutschland ist nicht sachgerecht.

ANNEX A QUALITATIVE EINORDNUNG DER STUDIEN

Im Folgenden erläutern wir den Hintergrund zur qualitativen Einordnung der Studien bezüglich der Breite des Untersuchungsspektrums.¹³

- ifo-Institut
 - Die Studie wählt einen sehr **engen Analyseansatz** (Abbildung 12, **y-Achse, unten**): Es werden zwei real existierende Fahrzeugmodelle einer Fahrzeugklasse (Oberklasse), eines mit Dieselmotor und eines mit batterieelektrischem Antrieb, verglichen. Die End-of-Life Phase ist nicht Bestandteil der Lebenszyklusanalyse. Das BEV wird mit Strom geladen, der über die Nutzungsdauer des Fahrzeugs hinweg eine konstante CO₂-Intensität aufweist (statisch). Es wird lediglich eine Batteriegröße betrachtet. Ein perspektivisch zunehmender Einsatz klimaneutraler synthetischer Kraftstoffe (sogenannter E-Fuels) wurde in dieser Analyse nicht berücksichtigt.
 - Die Studie weist im Ergebnis eine **Vorteilhaftigkeit des Diesel-ICEV** gegenüber dem BEV auf (Abbildung 12, **x-Achse, rechts**). Die Vorteilhaftigkeit des ICEV zeigt sich hierbei im Referenzszenario, bei dem für das BEV der derzeitige deutsche Strommix für den Ladestrom angenommen wird. Noch deutlicher wird dieser Vorteil in Szenarien, in denen der Ladestrom ausschließlich durch fossile Energie hergestellt wird.
- FfE
 - Die Studie zeigt eine **etwas breiter aufgestellte Herangehensweise** (Abbildung 12, **y-Achse, untere Mitte**). Es wird, wie bei ifo, nur eine Fahrzeugklasse (hier Kompaktklasse) und eine Verbrennungstechnologie (hier Benzin-ICEV) sowie ein BEV mit einer Batteriegröße untersucht. Die End-of-Life-Phase des Fahrzeugs sowie ein perspektivisch zunehmender Einsatz klimaneutraler synthetischer Kraftstoffe (sogenannter E-Fuels) wird nicht berücksichtigt. Allerdings sorgen jeweils generisch modellierte Fahrzeuge für eine größere Repräsentativität der CO₂-Gesamtbilanz. Es wird zudem eine detaillierte Untersuchung der Batterieherstellungsemissionen vorgenommen. Geladen wird die Batterie mit drei

¹³ Diese Einordnung erhebt keinen Anspruch auf Allgemeingültigkeit und reflektiert die Einschätzung der Autoren.

VERGLEICH VON STUDIEN ZUR CO₂-GESAMTBILANZ FÜR ANTRIEBSTECHNOLOGIEN IM INDIVIDUALVERKEHR

verschiedenen statischen Strommixen. Insgesamt bleibt der Analyserahmen damit jedoch verhältnismäßig eng.

- FfE sieht **das BEV gegenüber dem Benzin-ICEV** deutlich im Vorteil (Abbildung 12, **x-Achse, links**). Die Gesamtemissionen des BEV bleiben mit allen Strommixvarianten unter denen des Benzinfahrzeugs.
- Fraunhofer
 - Die Studie wendet einen relativ zur FfE-Studie **breiteren Analyserahmen** an (Abbildung 12, **y-Achse, Mitte**), da drei verschiedene Fahrzeugklassen herangezogen und sowohl ein Diesel- als auch ein Benzin-ICEV einem BEV gegenübergestellt werden. Es werden insgesamt sechs verschiedene Szenarien für den Ladestrom berechnet – hierbei wird ein zu erwartender steigender Anteil an erneuerbarem Strom unterstellt (dynamische Entwicklung). Hinzu kommen Sensitivitäten für die Reichweite eines BEV, womit indirekt unterschiedliche Batteriegrößen unterstellt werden. Ein perspektivisch zunehmender Einsatz klimaneutraler synthetischer Kraftstoffe (sog. E-Fuels) wird im Bericht thematisiert, aber in der quantitativen Analyse nicht berücksichtigt.
 - In den in der Studie primär diskutierten Ladestromszenarien schneiden die **batterieelektrischen Fahrzeuge klimabilanziell durchweg besser** ab als beide ICEV-Typen (Abbildung 12, **y-Achse, außen links**).
- Agora (April 2019)
 - Die Studie weist eine ähnliche **Analysebreite** wie die Studie von Fraunhofer auf (Abbildung 12, **y-Achse, Mitte**). Zwar wird hier nur die Kompaktfahrzeugklasse betrachtet, aber es wird eine ausführliche Aufschlüsselung der Herstellungs- und der End-of-Life-Emissionen für die drei Antriebstechnologien Benzin, Diesel und BEV vorgenommen. Zudem werden für das BEV diverse (dynamische) Strommixe und weitere Sensitivitäten, wie z.B. unterschiedliche Batteriegrößen, untersucht. Ein perspektivisch zunehmender Einsatz klimaneutraler synthetischer Kraftstoffe (sog. E-Fuels) wird im Bericht thematisiert, aber in der quantitativen Analyse nicht berücksichtigt.
 - Die Studie weist im Ergebnis eine Vorteilhaftigkeit des BEV ggü. ICEV Fahrzeugen aus, aber im Vergleich zur Fraunhofer Studie in einem geringeren Umfang (Abbildung 12, **x-Achse, links**).
- Agora (Dezember 2019)
 - Die Studie ergänzt die Agora-Studie aus dem April 2019, indem sie sich zusätzlich mit flüssigen und gasförmigen E-Fuels und Brennstoffzellen-Fahrzeugen beschäftigt

VERGLEICH VON STUDIEN ZUR CO₂-GESAMTBILANZ FÜR ANTRIEBSTECHNOLOGIEN IM INDIVIDUALVERKEHR

(Abbildung 12, **y-Achse, obere Mitte**). Außerdem wird neben einem gemischten Fahrprofil auch ein Profil mit reiner Autobahnnutzung analysiert. Weiterhin werden Sensitivitäten für eine größere Batteriekapazität und eine höhere Lebensfahrleistung behandelt.

- Die Studie nimmt an, dass E-Fuels mit dem (dynamisch modellierten) deutschen Strommix bis 2030 erzeugt werden. Daher fallen jeweils erhebliche CO₂-Mengen im Laufe der Nutzungsphase der synthetisch erzeugten Kraftstoffen an. Im Ergebnis zeigt sich dadurch ein größerer Vorteil von BEV ggü. ICEV als in der Vorgängerstudie. (Abbildung 12, **x-Achse, außen links**)
- Zapf et al. und Joanneum
 - Die Studien weisen viele Gemeinsamkeiten auf und heben sich durch den sehr breiten Analyserahmen von den zuvor genannten Untersuchungen ab (Abbildung 12, **y-Achse, oben**). Beide Studien berücksichtigen nahezu alle derzeit und in absehbarer Zukunft potentiell existierenden Antriebstechnologien für Pkw. Dazu wird ebenso in beiden Studien die CO₂-Bilanz für alle Technologien jeweils für heute, für das Jahr 2030 und für 2050 analysiert. Während Zapf et al. neben einem Standardfahrprofil auch Effekte durch andere Fahrprofile berechnet, beschäftigt sich Joanneum mit der Nutzung von Fahrzeugen in verschiedenen Ländern und untersucht die dortigen Strommixe im Zusammenhang mit dem Ladestrom für BEV.
 - Beide Studien leiten **keine eindeutige Vorteilhaftigkeit einer Technologie** (Abbildung 12, **x-Achse, Mitte**) ab.
- Frontier Economics
 - Die Studie weist gemeinsam mit Zapf et al. und Joanneum insgesamt den breitesten Analyseansatz der betrachteten Studien auf (Abbildung 12, **y-Achse, oben**). Die Analyse gestaltet sich über eine Reihe von Stellschrauben, die miteinander kombiniert werden können, als flexibel: Zur Auswahl stehen zum Beispiel vier verschiedene Fahrzeugklassen mit entsprechend angepasster Batteriegröße bei den jeweiligen BEV-Modellen; drei verschiedene Strommix-Szenarien, sowohl für das Herstellungsland als auch für den Ladestrom; oder flexibel einstellbare E-Fuel-Beimischungsanteile. Auch kann im Berechnungstool ab heute bis zum Jahr 2040 jedes einzelne Jahr als Anschaffungszeitpunkt des Fahrzeugs gewählt werden. Die Emissionsintensität der Strommixe werden für jedes Jahr bis 2050 für ein Referenzszenario, ein optimistisches und ein pessimistisches Szenario berechnet. Die Untersuchungen von Frontier Economics konzentrieren sich auf lediglich drei Antriebstechnologien, die heute entweder eine überwiegende Marktrelevanz aufweisen

VERGLEICH VON STUDIEN ZUR CO₂-GESAMTBILANZ FÜR ANTRIEBSTECHNOLOGIEN IM INDIVIDUALVERKEHR

(Benzin ICEV, Diesel ICEV) oder derzeit politisch stark positioniert werden (BEV).

- Bei Frontier hängt die Vorteilhaftigkeit der Antriebstechnologien wie bei Zapf et al. und Joanneum vom betrachteten Einzelfall ab (Abbildung 12, **x-Achse, Mitte**).

ANNEX B REFERENZEN

- Zapf, Pengg, Bütler, Bach, Weindl (2019), **Kosteneffiziente und nachhaltige Automobile - Bewertung der realen Klimabelastung und der Gesamtkosten – Heute und in Zukunft**, <https://www.springer.com/de/book/9783658240592>
- Agora Verkehrswende (2019), **Klimabilanz von strombasierten Antrieben und Kraftstoffen**, Agora Verkehrswende, Dezember 2019.
- Frontier Economics (2019), **Die CO₂-Gesamtbilanz für Antriebstechnologien im Individualverkehr heute und in Zukunft**, Studie im Auftrag von UNITI Bundesverband mittelständischer Mineralölunternehmen e.V., November 2019.
- Joanneum Research (2019), **Geschätzte Treibhausgasemissionen und Primärenergieverbrauch in der Lebenszyklusanalyse von Pkw-basierten Verkehrssystemen**, Studie im Auftrag des ADAC, September 2019, https://res.cloudinary.com/adacde/image/upload/v1572625374/ADAC-eV/KOR/Text/PDF/LCA_Tool_-_Joanneum_Research_zp22wt.pdf
- Agora Verkehrswende (2019), **Klimabilanz von Elektroautos - Einflussfaktoren und Verbesserungspotenzial**, Agora Verkehrswende, April 2019.
- Buchal, Karl und Sinn (2019), **Kohlemotoren, Windmotoren und Dieselmotoren: Was zeigt die CO₂-Bilanz?**, ifo-Institut Schnelldienst, April 2019.
- Fraunhofer (2019), **Die aktuelle Treibhausgasemissionsbilanz von Elektrofahrzeugen in Deutschland**, Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI, März 2019.
- Forschungsstelle für Energiewirtschaft (2019), **Klimabilanz von Elektrofahrzeugen – Ein Plädoyer für mehr Sachlichkeit**, Forschungsstelle für Energiewirtschaft (FfE) e.V., Februar 2019.

