

NOTWENDIGKEIT EINER LEBENSZYKLUSANALYSE IN DER FLOTTENREGULIERUNG

Studie im Auftrag von UNITI Bundesverband
mittelständischer Mineralölunternehmen e.V.

18. AUGUST 2023

DR. JENS PERNER
THERESA STEINFORT
MARION LOTHMANN

Inhalt

Zusammenfassung	4
1 Auftrag und Struktur der Studie	7
2 Die Flottenregulierung setzt Emissionsziele für Neufahrzeuge, um die CO ₂ -Emissionen im Verkehrssektor zu senken	8
3 Die Flottenregulierung berücksichtigt im „Tank-to-Wheel“ (TTW)-Ansatz nur einen Ausschnitt der Lebenszyklusemissionen	12
3.1 Der „TTW“-Ansatz berücksichtigt nur CO ₂ -Emissionen, die unmittelbar bei der Nutzung (an der Fahrzeugabgasanlage) anfallen	12
3.2 Der LCA-Ansatz berücksichtigt CO ₂ -Emissionen entlang des gesamten Lebenszyklus und über alle Produktstufen hinweg	14
4 Der Fokus auf TTW-Emissionen verzerrt die Beurteilung der CO ₂ -Emissionen von Antriebstechnologien	21
4.1 Unter Verwendung eines LCA-Ansatzes wird deutlich, dass keine eindeutigen Aussagen zur klimapolitischen Vorteilhaftigkeit von Antriebstechnologien getroffen werden können	21
4.2 Auch aus Berechnungen der EU-Kommission lässt sich ableiten, dass Verbrenner mit CO ₂ -neutralen Kraftstoffen eine bessere CO ₂ -Bilanz aufweisen können als Elektrofahrzeuge	28
5 LCA-Ansatz setzt sich in der Fachliteratur und Regulierung zunehmend durch	31
5.1 Die Verwendung von Lebenszyklusanalysen ist in der Fachliteratur heute Standard	31
5.2 LCA-Ansätze haben sich auch bereits in der Regulierung etabliert	31
6 Die Verzerrung der Technologiewahl hat negative Folgen und läuft den Zielsetzungen des Klimaschutzes entgegen	35
6.1 Bei Verwendung eines TTW-Ansatzes ist nicht sichergestellt, dass sachgerechte Anreize zur Minderung von CO ₂ gesetzt werden	35
6.2 Bei Verwendung eines LCA-Ansatzes werden Emissionen ggf. in das Ausland verlagert	36

7	Fazit	37
8	Literaturverzeichnis	38
	Annex A - Annex	42
A.1	Übersicht der Tankstellen Klimadiesel25 und Klimadiesel90	42
A.2	Annahmen für die punktuellen Modellanpassungen	44

ZUSAMMENFASSUNG

Die CO₂-Emissionsnormen für neue Personenkraftwagen und für neue leichte Nutzfahrzeuge (Verordnung (EU) 2019/631, im Folgenden „Flottenregulierung“) sollen die Treibhausgasemissionen in der EU mindern.¹

Die bisherige wie auch jüngst in Kraft getretene Regulierung (2023/851) verfolgt einen Tank-to-Wheel Ansatz („TTW“), der nur einen Ausschnitt („Auspuffemission“) der CO₂-Emissionen berücksichtigt, die über den gesamten Lebenszyklus eines Fahrzeugs anfallen.

Bei einem TTW-Ansatz erscheinen elektrische Fahrzeuge grundsätzlich als emissionsfrei, während Fahrzeuge mit Verbrennungsmotoren durchgehend CO₂-Emissionen aufweisen. Die Flottenregulierung unterscheidet hierbei nicht, ob Kraftstoffe CO₂-reduziert bzw. neutral hergestellt werden: Biokraftstoffe wie z.B. aus Rest- und Abfallstoffen hergestelltes Hydrotreated Vegetable Oil (HVO), aus erneuerbarem Strom hergestellte Kraftstoffe wie E-Fuels etc.

Im Gegensatz zum TTW-Ansatz werden bei Lebenszyklusanalysen (Life cycle assessment, im Folgenden „LCA“) weitere wesentliche Emissionen von Kraftfahrzeugen erfasst, wie insbesondere:

- (a) **Fahrzeugherstellung („Cradle-to-Gate“):** Dies umfasst alle CO₂-Emissionen, die während der Herstellung der Komponenten der verschiedenen Antriebssysteme und der Karosserie sowie anderer Fahrzeugkomponenten wie z.B. der Ausstattung der Fahrzeuge (inklusive Batterien bei batterieelektrischen Fahrzeugen) anfallen.
- (b) **Energiebereitstellung („Well-to-Tank“):** Die CO₂-Emissionen der Bereitstellung des benötigten Kraftstoffs bzw. des Ladestroms, inklusive der Vorketten.
- (c) **Infrastrukturbereitstellung:** Je nach Antriebs- bzw. Kraftstoffart bedarf es an zusätzlicher Infrastruktur (z.B. Ladesäuleninfrastruktur, Aufbau von Synthesekapazitäten für die Herstellung von synthetischen Flüssigkraftstoffen etc.)
- (d) **Fahrzeugnutzung („Tank-to-Wheel“):** Dies umfasst alle CO₂-Emissionen, die während der Nutzung des Fahrzeugs entstehen, in erster Linie die sogenannten Auspuffemissionen.
- (e) **Entsorgung bzw. Recycling („End-of-Life“):** Die Entsorgung bzw. das Demontieren oder Recycling am Lebensende eines Fahrzeugs erzeugt ggf.

¹ Siehe Verordnung (EU) 2019/631, <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/HTML/?uri=CELEX:32019R0631#d1e1329-13-1>

NOTWENDIGKEIT EINER LEBENSZYKLUSANALYSE IN DER FLOTTENREGULIERUNG

ebenfalls CO₂-Emissionen (z.B. auch durch den Einsatz von Strom, wenn dieser noch nicht zu 100% aus erneuerbaren Energien erzeugt wird).

Wird ein LCA-Ansatz verwendet, zeigt sich, dass keine Antriebstechnologie mit Blick auf die CO₂-Emissionen und dem Potential, CO₂-Emissionen einzusparen, eindeutig im Vorteil ist. Das ist anders bei der Verwendung eines TTW-Ansatzes. Die Klimawirksamkeit einzelner Antriebstechnologien und Fahrzeuge hängen unter Verwendung eines LCA-Ansatzes von einer Vielzahl von Faktoren ab, wie z.B. der CO₂-Intensität des zugrunde gelegten Strommixes als Antriebsenergie für batterieelektrische Fahrzeuge, die CO₂-Emissionen für die Herstellung der Fahrzeugkomponenten (v.a. Batterieherstellung), dem Anteil CO₂-neutraler Kraftstoffe bei Einsatz in Verbrennungsmotoren etc.

Die über den Lebenszyklus ermittelten CO₂-Emissionen sind dementsprechend einzelfallabhängig, sowohl für batterieelektrische Fahrzeuge wie auch für Fahrzeuge mit Verbrennungsmotoren. Entsprechend hängt auch die Vorteilhaftigkeit im Hinblick auf die Klimawirksamkeit einer Antriebstechnologie vom Einzelfall ab.

Je nach Fall kann sich somit ein Fahrzeug mit batterieelektrischem Antrieb oder mit einem Verbrennungsmotor als vorteilhaft bezüglich der CO₂-Lebenszyklusemissionen erweisen. Ein TTW-Ansatz suggeriert dagegen pauschal eine Vorteilhaftigkeit auf Seiten des batterieelektrischen Fahrzeugs. Dieser ist aus Perspektive des Klimaschutzes für die Ermittlung von CO₂-Emissionen deshalb nicht sachgerecht. Erforderlich sind Ansätze auf Basis von Lebenszyklusanalysen.

Es ist zudem ein übergreifender Trend Richtung Lebenszyklusanalyse zur Erfassung von CO₂-Emissionen von Produkten und Technologien in der Fachliteratur wie auch in klimapolitische Regulierungen zu beobachten.

Die Verwendung eines TTW-Ansatzes in der Regulierung von Sektoren birgt die Gefahr von Verzerrungen und Fehlanreizen. Dies kann den Zielsetzungen des Klimaschutzes entgegenstehen.

- (a) Es werden bei Verwendung eines TTW-Ansatzes ggf. von den Akteuren Technologien gewählt, die insgesamt zu höheren CO₂-Emissionen führen können. Dies wirkt dem Klimaschutz entgegen. In welchem Ausmaß dies eintritt, hängt von einer Vielzahl von Faktoren ab, insbesondere auch von dem Zusammenspiel aller Anreiz- und Fördersysteme für die Technologien zur Senkung der CO₂-Emissionen über alle Wertschöpfungsstufen hinweg.
- (b) CO₂-Emissionen, die außerhalb der EU anfallen, werden bei einem TTW-Ansatz systematisch nicht erfasst und bewertet. Damit sind zwar einerseits die klimapolitischen Ziele innerhalb der EU einfacher erreichbar, allerdings wird der Klimaschutz global geschwächt. Politische und regulatorische Maßnahmen, die hierbei korrigierend wirken können wie z.B. „Carbon Border Adjustment Measures“

NOTWENDIGKEIT EINER LEBENSZYKLUSANALYSE IN DER FLOTTENREGULIERUNG

(CBAM), sind derzeit noch nicht wirksam, und deren zukünftige Ausgestaltung ist zumindest in Teilen noch offen.

In der Gesamtschau entspricht demnach die Verwendung eines LCA-Ansatzes zur Erfassung von CO₂-Emissionen von Produkten und Technologien dem Stand der Wissenschaft und ist zur Erfassung der Klimawirksamkeit als sachgerecht zu beurteilen.

1 Auftrag und Struktur der Studie

Die CO₂-Emissionsnormen für neue Personenkraftwagen und für neue leichte Nutzfahrzeuge (Verordnung (EU) 2019/631, im Folgenden „Flottenregulierung“) sollen die Treibhausgasemissionen in der EU mindern.² Die aktuelle Regulierung verfolgt dabei einen Tank-to-Wheel Ansatz („TTW“), der nur einen Ausschnitt („Auspuffemission“) der CO₂-Emissionen berücksichtigt, die über den gesamten Lebenszyklus eines Fahrzeugs anfallen.

Frontier Economics hat im Auftrag von UNITI Bundesverband mittelständischer Mineralölunternehmen e. V. im Jahr 2019 ein Modell zur Berechnung von CO₂-Emissionen für PKW entwickelt.³ Berechnet werden mit diesem Modell die CO₂-Emissionen von batterieelektrischen Fahrzeugen (Battery Electric Vehicle, BEV) und Fahrzeugen mit Verbrennungsmotoren (Internal Combustion Engine Vehicle, ICEV) in verschiedenen Herstellungs- und Nutzungsszenarien.

Vor diesem Hintergrund hat der UNITI Bundesverband mittelständischer Mineralölunternehmen e. V. Frontier Economics beauftragt, unterschiedliche Ansätzen zur Erfassung der Klimabilanz verschiedener Antriebsarten – zum einen die TTW-Betrachtung und zum anderen die Betrachtung eines Lebenszyklus (Lebenszyklusanalyse, LCA) – gegenüber zu stellen und zu veranschaulichen. Dabei werden wesentliche Annahmen und Daten der Berechnungen gegenüber dem Sachstand 2019 punktuell aktualisiert.

Die Kurzstudie umfasst folgende inhaltliche Schwerpunkte:

- Abschnitt 2 beleuchtet den Hintergrund der Flottenregulierung,
- Abschnitt 3 vergleicht den methodischen Ansatz zur Erfassung der CO₂-Emissionen fokussiert auf die Auspuffemissionen (Tank-to-Wheel, TTW), der in der Flottenregulierung zur Anwendung gelangt, mit einer Erfassung der CO₂-Emissionen über den gesamten Lebenszyklus.
- Abschnitt 4 illustriert die Ergebnisse, die sich einerseits bei einer CO₂-Erfassung über den TTW-Ansatz und andererseits über den Lebenszyklus ergeben anhand eines beispielhaften Fahrzeugtyps und einer beispielhaften Fahrzeugnutzung.
- In Abschnitt 5 wird aufgezeigt, dass sich der Lebenszyklusansatz sowohl in der Fachliteratur als auch in Regulierungen zum Klimaschutz zunehmend durchsetzt,
- In Abschnitt 6 weisen wir auf Risiken der Verwendung eines TTW-Ansatzes und die Folgen für den Klimaschutz hin,
- Abschnitt 7 enthält das Fazit

² Siehe Verordnung (EU) 2019/631, <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/HTML/?uri=CELEX:32019R0631#d1e1329-13-1>, Artikel 1 (1).

³ Siehe Frontier Economics (2019).

2 Die Flottenregulierung setzt Emissionsziele für Neufahrzeuge, um die CO₂-Emissionen im Verkehrssektor zu senken

Seit 2009 gelten in der Europäischen Union Emissionsvorschriften für PKW und leichte Nutzfahrzeuge. Der Grundgedanke ist, dass alle Hersteller den europaweiten durchschnittlichen CO₂-Ausstoß ihrer Neufahrzeuge jährlich unter einen zunehmend restriktiven Flottengrenzwert senken müssen oder mit vergleichsweise hohen Strafen (von aktuell rund 450-600 Euro pro Tonne CO₂, siehe Tabelle 1) bei Überschreitung des Flottenziels rechnen müssen.

In dieser Verordnung werden Anforderungen an die CO₂-Emissionsleistung neuer Personenkraftwagen und neuer leichter Nutzfahrzeuge aufgestellt, um dazu beizutragen, dass die von der Union angestrebte Verringerung der Treibhausgasemissionen, wie sie in der Verordnung (EU) 2018/842 festgelegt ist, erreicht wird und die im Übereinkommen von Paris verankerten Zielsetzungen verwirklicht werden, und um das reibungslose Funktionieren des Binnenmarktes sicherzustellen.⁴

Am 1. Januar 2020 trat Verordnung (EU) 2019/631 in Kraft, die CO₂-Emissionsnormen für neue Personenkraftwagen (PKW) und leichte Nutzfahrzeuge (LNFZ) festlegt. Sie ersetzte und hob die früheren Verordnungen (EG) 443/2009 (PKW) und (EU) 510/2011 (LNFZ) auf.

Am 25. April 2023 trat die neue Verordnung (EU) 2023/851⁵ zur Änderung der Verordnung (EU) 2019/631 in Kraft, um die CO₂-Emissionsnormen für neue Personenkraftwagen und neue leichte Nutzfahrzeuge im Einklang mit den verstärkten Klimazielen der Europäischen Union (im Rahmen des Fit-for-55-Pakets)⁶ zu stärken. Mit der Änderung werden insbesondere die ab 2030 geltenden Emissionsziele verschärft und ein 100%iges Reduktionsziel ab 2035 festgelegt. Der TTW-Ansatz, d.h. das alleinige Abstellen auf Auspuffemissionen, wurde beibehalten, so dass ab 2035 de-facto ein Verbot für die Neuzulassung von Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor in Kraft tritt und nur noch elektrisch betriebene Fahrzeuge die Null-Emissionsvorgabe erfüllen können.⁷

Tabelle 1 fasst die wesentlichen Eckpunkte zusammen:

⁴ Siehe Artikel 1 (1) der Verordnung (EU) 2019/631.

⁵ Verordnung (EU) 2023/851, <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/HTML/?uri=CELEX:32023R0851&qid=1688743351340>

⁶ Vgl. Europäische Kommission (2021a).

⁷ Verbrennungsmotoren können auch mit Wasserstoff betrieben werden. Da Wasserstoff keinen Kohlenstoff enthält, werden im Abgas keine kohlenstoffhaltigen Schadstoffe freigesetzt. In der Praxis spielt diese Antriebsart im Verkehrsbereich derzeit aber keine Rolle.

Tabelle 1 Eckpunkte Flottenregulierung (Stand Juni 2023)

Adressat	Fahrzeughersteller ⁸ (OEM)
Bezugsgröße	Neuzulassungen von PKW und LNFZ in der EU innerhalb eines Kalenderjahres
Zielgröße	<ul style="list-style-type: none"> ■ Flottendurchschnitt der Tank-to-wheel (Auspuffemissionen) gemessen in Gramm CO₂ pro km Fahrleistung („g/km“) (siehe Abschnitt 3 für weitere Erläuterung) ■ Ab 2021 werden Emissionen pro Neufahrzeug und die Zielgrößen über das WLTP-Verfahren („Worldwide harmonized Light vehicles Test Procedure“) bestimmt
Emissionsziele	<ul style="list-style-type: none"> ■ Ziel 2020 (Ausgangswert in NEDC⁹) <ul style="list-style-type: none"> • PKW: 95 g/km • LNFZ: 147 g/km ■ Zielpfad (im Vergleich zu 2021): <ul style="list-style-type: none"> • PKW: -15% ab 2025, -55% ab 2030, -100% ab 2035 • LNFZ: -15% ab 2025, -50% ab 2030, -100% ab 2035
OEM-spezifische Zielanpassung	Anhand des Durchschnittsgewichts in der Fahrzeugflotte (d.h. je schwerer, desto höherer ist der individuelle Zielwert)
Strafzahlung bei Überschreitung	OEM müssen bei Überschreiten ihres Flottenziels eine Strafe von 95 EUR/g/km (~450-600 EUR/t CO ₂ ¹⁰) pro Neufahrzeug leisten:
Sonstige Regelungen	<ul style="list-style-type: none"> ■ OEMs können sich zu einem CO₂-Pool zusammenschließen und ein gemeinsames Emissionsziel erreichen (beschränkt auf max. 5 Jahre). ■ Durch Einsatz der deutschen Bundesregierung wurde der Erwägungsgrund 11 in die Verordnung integriert. Dieser lautet wie folgt: „Nach Konsultation der Interessenträger wird die Kommission – im Einklang mit dem Unionsrecht, außerhalb des Geltungsbereichs der für die Fahrzeugflotten geltenden Normen und in Übereinstimmung mit dem Ziel der

⁸ Es gelten Ausnahmen für Hersteller mit weniger als 300.000 zugelassenen Fahrzeuge pro Jahr und eine Befreiung für Hersteller mit weniger als 1.000 Fahrzeugen. Dies Ausnahmen laufen nach dem Jahr 2028 aus.

⁹ Die Zielwerte in 2020 wurden durch das damals geltende NEDC-Testverfahren ermittelt, das inzwischen von dem WLTP-Verfahren abgelöst wurde.

¹⁰ 95 EUR/g/km geteilt durch eine durchschnittliche Lebenslaufleistung von 160.000 - 200.000 km, multipliziert mit dem Faktor 10⁶ (g/t). Die Annahme einer längeren Fahrleistung würde zu einem niedrigeren CO₂-Preis führen und umgekehrt.

Klimaneutralität der Union – einen Vorschlag für die nach 2035 erfolgende Zulassung von Fahrzeugen, die ausschließlich mit CO₂-neutralen Kraftstoffen betrieben werden, vorlegen.“¹¹. Allerdings ist diese Sonderregelung noch von der Kommission zu entwickeln. Es ist derzeit noch unklar, ob und wie eine Umsetzung erfolgen soll. Der zuständige Kommissar, Frans Timmermans, hat dies angekündigt, jedoch noch keinen Entwurf vorgelegt¹². Der Erwägungsgrund selbst bietet zudem hierzu keine Rechtssicherheit. So hat das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz (BMUV) erklärt: „Im Gegensatz zu den Rechtsnormen selbst können aus den Erwägungsgründen keine unmittelbaren Rechtsfolgen abgeleitet werden, sondern sie sind deklarativ.“¹³

- Zudem ergibt sich bereits aus der Flottenregulierung selbst die Bedeutung der Nutzung von Lebenszyklusanalysen zur Bewertung der THG-Emissionen von konventionellen und alternativ betriebenen Fahrzeuge. So ist in den Verordnungen zur Festlegung von CO₂-Emissionsnormen für Personenkraftwagen und leichte Nutzfahrzeuge¹⁴ und für schwere Nutzfahrzeuge¹⁵ vorgesehen, dass die Emissionen von solchen Fahrzeugen, die in der Union in den Verkehr gebracht werden, über den gesamten Lebenszyklus bewertet werden müssen. Dazu sollte die Kommission bis zum Jahr 2023 die Möglichkeit prüfen, eine entsprechende Methodik zu entwickeln und geeignete Folgemaßnahmen und ggf. Legislativvorschläge zu unterbreiten.¹⁶ Gemäß der Verordnung (EU) 2023/851 des europäischen Parlaments und des Rates vom 19. April 2023 zur Änderung der Verordnung (EU) 2019/631 im Hinblick auf eine Verschärfung der CO₂-Emissionsnormen für neue Personenkraftwagen und für neue leichte Nutzfahrzeuge¹⁷ wurde diese Zielsetzung jedoch zeitlich verschoben. Laut dem neu eingefügten Artikel 7a

¹¹ Verordnung (EU) 2023/851 <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:32023R0851>

¹² Vgl. BMUV (2023).

¹³ Vgl. BMUV (2023).

¹⁴ Verordnung (EU) 2019/631, <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:32019R0631>.

¹⁵ Verordnung (EU) 2019/1242, <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:32019R1242&qid=1689162171924>

¹⁶ Verordnung (EU) 2019/631 und 2019/1242, Art. 15 Para. 2.

¹⁷ Verordnung (EU) 2023/851 <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:32023R0851>

veröffentlicht die Kommission bis zum 31. Dezember 2025 eine Methodenbeschreibung für die Erfassung der CO₂-Emissionen über den gesamten Lebenszyklus. Allerdings sprechen die beiden folgenden Gründe dagegen, dass dieser Artikel 7a eine konkrete Relevanz im Zusammenhang mit den Flotten-CO₂-Zielwerten entfalten wird: i) Es geht im Artikel 7a Abs. 1 und 2 lediglich um die Beschreibung und Festlegung einer gemeinsamen Unionsmethode für die Meldung (also Veröffentlichung) der CO₂-Emissionen über den Lebenszyklus hinweg. Demnach haben zwar Hersteller von Antriebstechnologien, die durch eine übergreifende Erfassung der CO₂-Emissionen beweisen können, dass die CO₂-Bilanz ihrer Antriebstechnologie(n) vorteilhafter als bei einem alleinigen TTW-Ansatz ist, grundsätzlich ein Interesse daran, diese Informationen bereitzustellen, allerdings haben diese Informationen keine ersichtliche Relevanz für die Methodik der Grenzwertfassung. Es ist also nicht ersichtlich, wie dieser Artikel zur Umsetzung einer sachgerechten Berücksichtigung der durch Mobilität verursachten CO₂-Emissionen beitragen wird. ii) Die Übermittlung der entsprechenden Daten ist für die Hersteller zudem freiwillig (vgl. Absatz 3, Artikel 7a der besagten Verordnung). Es ist unklar, inwieweit die Hersteller diese freiwillige Option nutzen werden.

Quelle: *Frontier Economics* basierend auf der konsolidierten Fassung <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/HTML/?uri=CELEX:02019R0631-20230515#toctd7>

3 Die Flottenregulierung berücksichtigt im „Tank-to-Wheel“ (TTW)-Ansatz nur einen Ausschnitt der Lebenszyklusemissionen

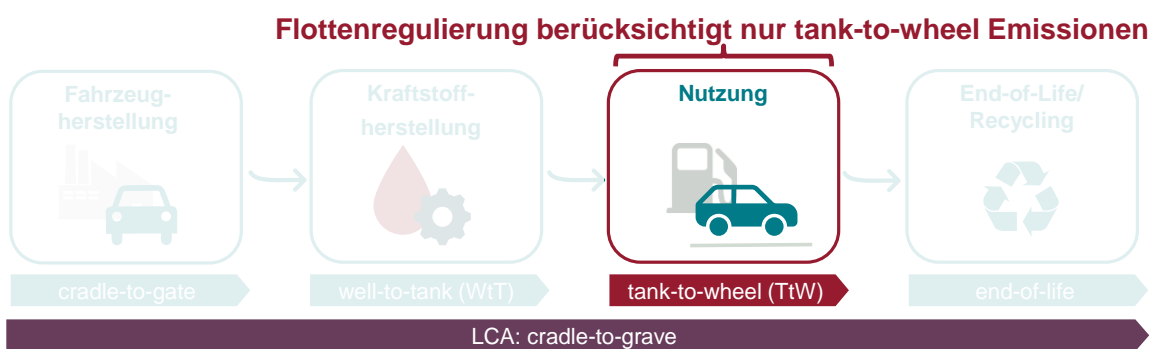
In diesem Abschnitt zeigen wir, dass der in der Flottenregulierung verwendete „TTW“-Ansatz

- nur CO₂-Emissionen berücksichtigt, die unmittelbar bei der Nutzung (am Fahrzeugauspuff) anfallen (Abschnitt 3.1); und
- damit ein Großteil der CO₂-Emissionen im Lebenszyklus eines Fahrzeugs vernachlässigt werden (Abschnitt 3.2).

3.1 Der „TTW“-Ansatz berücksichtigt nur CO₂-Emissionen, die unmittelbar bei der Nutzung (an der Fahrzeugabgasanlage) anfallen

Die Flottenregulierung fokussiert auf die Tank-to-Wheel CO₂-Emissionen des Fahrzeugs selbst, die sogenannten Auspuffemissionen. Diese Emissionen werden während der Nutzung des Fahrzeugs selbst ausgestoßen.

Abbildung 1 Der TTW-Ansatz erfasst nur CO₂-Emissionen während der Fahrzeugnutzung



Quelle: Frontier Economics

Der TTW-Ansatz (also Fokus auf Auspuffemissionen) hat für die Flottenregulierung folgende Auswirkungen:

- (a) Die CO₂-Emissionen elektrischer¹⁸ Fahrzeuge erhalten durchgehend einen Wert von Null, da sie keine Abgasanlage haben, unabhängig davon, welche CO₂-

¹⁸ Dies schließt batterieelektrische Fahrzeuge und Fahrzeuge mit Brennstoffzellen, in denen Wasserstoff in Strom umgewandelt wird, mit ein.

NOTWENDIGKEIT EINER LEBENSZYKLUSANALYSE IN DER FLOTTENREGULIERUNG

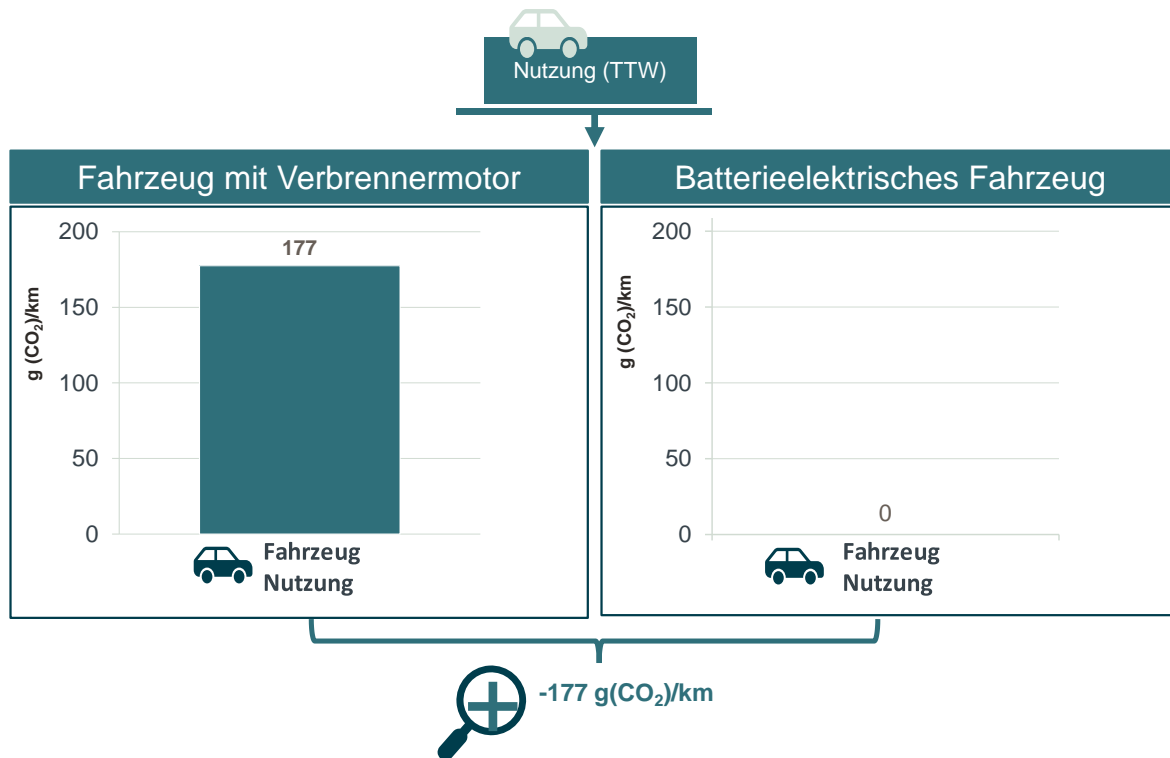
Emissionen bei der Fahrzeugherstellung (inkl. Batterie), der Strom- oder Wasserstoffherzeugung und der Endverwertung anfallen.

- (b) Dagegen sind CO₂-Emissionen von Fahrzeugen mit Verbrennungsmotoren immer positiv und nur abhängig von den Verbrauchswerten des jeweiligen Fahrzeugmodells (gemessen anhand der modellspezifischen Kriterien „Worldwide Harmonised Light-Duty Vehicles Test Procedure“ (WLTP) - Wert2), unabhängig z.B. davon ob
 - (i) bei der Herstellung des Fahrzeugs mit aus fossiler oder aus erneuerbarer Energie hergestellte Bauteile verwendet werden; wie z.B. metallische Bauteile aus „grünem Stahl“ oder „grünem Aluminium“, oder klimafreundlich hergestellte nichtmetallische Komponenten (Kunststoffe);
 - (ii) ob das Fahrzeug mit CO₂-neutralen Kraftstoffen betankt wird. Der Begriff „CO₂-neutrale Kraftstoffe“ steht hier sowie im Folgenden sowohl für Biokraftstoffe wie z.B. Biomasse aus Rest- und Abfallstoffen (beispielsweise aus gebrauchtem Speiseöl hergestelltes Hydrotreated Vegetable Oil (HVO)) als auch für Kraftstoffe, die aus erneuerbarem Strom hergestellt werden (E-Fuels).¹⁹

Abbildung 2 zeigt dies illustrativ anhand des Vergleichs zwischen einem batterieelektrischen Fahrzeug (rechts) mit vermeintlichen „Null-Emissionen“ und einem Fahrzeug mit Verbrennungsmotor (links), das einen positiven TTW-CO₂-Wert aufweist.

¹⁹ In der gängigen Literatur, in der es um die Auswirkungen von Treibhausgasen auf die Erderwärmung geht, wird typischerweise synonym von Treibhausgasen und CO₂-Äquivalenten und der Einfachheit halber auch verkürzt von CO₂-Emissionen gesprochen. Entsprechend der Flottenregulierung, die sich ebenfalls spezifisch auf CO₂-Emissionen bezieht, nutzen wir den Begriff in der Kurzstudie ebenfalls synonym. Des Weiteren gibt es bei einer gesamtheitlichen Betrachtung der CO₂-Emissionen gewisse Unschärfen, ab wann der Begriff CO₂-*neutral* anzuwenden ist. Dies hängt davon ab, wie die Systemgrenze jeder CO₂-Erfassung gezogen wird (bspw. welcher „CO₂-Rucksack“ bei der Errichtung von (zusätzlichen) Wind-Kraftwerken genau berücksichtigt wird). Ausführungen dazu finden sich unter anderem in der Studie von Frontier Economics (2020). Im Folgenden nutzen wir trotz ggf. verbleibender indirekter CO₂-Emissionen aus Vorketten (je nach Systemgrenze) den Begriff CO₂-neutral, berücksichtigen jedoch die CO₂-Bilanz der Vorkettenemissionen aus EE-Anlagenerrichtung oder anderen Restemissionen in den Berechnungen. Entsprechend reduziert auch eine ausschließliche Nutzung von „CO₂-neutralen“ Kraftstoffen oder von 100% erneuerbar erzeugtem Ladestrom aus ausschließlich Erneuerbaren Energiequellen die Well-to-Wheel Emissionen nicht vollständig, solange Vorkettenemissionen bestehen.

Abbildung 2 Illustrativer Vergleich der CO₂-Emissionen nach dem TTW-Ansatz eines Beispielfahrzeugs jeweils mit batterieelektrischem Antrieb und Verbrennungsmotor, betrieben mit fossilen Kraftstoffen



Quelle: Darstellung aus Frontier Economics (2019), Aktualisierung der Annahmen und Daten im Juli 2023

Hinweis: Fahrzeugtyp: Mittelklasse, Jahr der Anschaffung: 2022, Nutzungsdauer: 10 Jahre, Jahresleistung: 15.000km, Kraftstoff: Benzin (10% Beimischung, E10), Betriebsland: Deutschland, Herstellungsemissionen Batterie (z.B. in China): 140 kgCO₂/kWh Batteriekapazität, dynamisch

3.2 Der LCA-Ansatz berücksichtigt CO₂-Emissionen entlang des gesamten Lebenszyklus und über alle Produktstufen hinweg

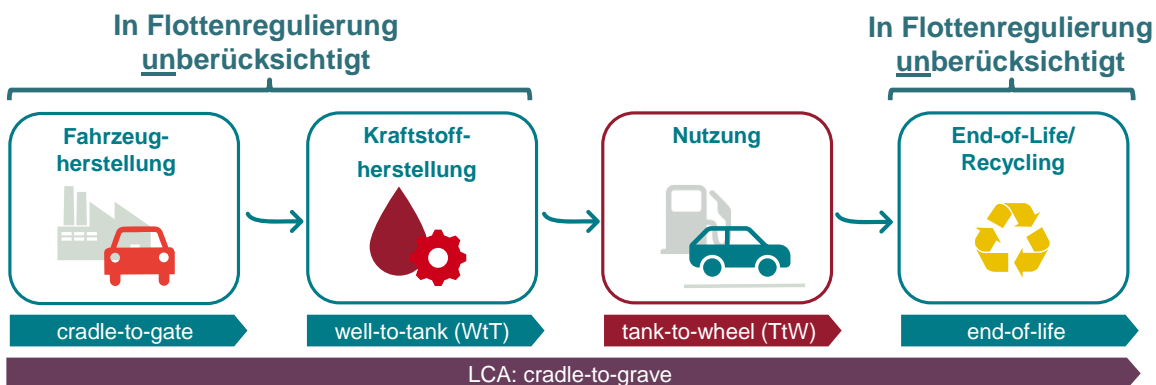
Im Lebenszyklus eines Fahrzeugs (siehe Abbildung 3) fallen grundsätzlich folgende CO₂-Emissionen entlang der Wertschöpfungsstufen an:

- **Fahrzeugherstellung („Cradle-to-Gate“):** Dies umfasst alle CO₂-Emissionen, die während der Herstellung der Komponenten der verschiedenen Antriebssysteme und der Karosserie sowie anderer Fahrzeugkomponenten wie z.B. der Ausstattung der Fahrzeuge (inklusive Batterien bei batterieelektrischen Fahrzeugen) anfallen. Die CO₂-Emissionen der Fahrzeug- bzw. der Komponentenherstellung sind von einer Vielzahl von Faktoren abhängig, wie z.B. der CO₂-Intensität des Energie- bzw. Strommix des

Herstellungslandes, der Technologie der verbauten Komponenten, der Produktionstechnologien etc.

- **Energiebereitstellung („Well-to-Tank“):** Dies umfasst die CO₂-Emissionen aus der Herstellung und dem Transport des benötigten Kraftstoffs bzw. des Ladestroms, inklusive der Vorketten. Hierbei ist die CO₂-Intensität der Herstellung der verwendeten Kraftstoffe und des Ladestroms zu berücksichtigen, der in der Region des Fahrzeugbetriebs zur Verfügung steht. Letztere verändern sich dynamisch v.a. durch den zunehmenden Einsatz von Erneuerbaren Energien zur Herstellung von Kraftstoffen wie auch von Ladestrom.
- **Infrastrukturbereitstellung:** Je nach Antriebs- bzw. Kraftstoffart bedarf es an zusätzlicher Infrastruktur (z.B. Ladesäuleninfrastruktur, Aufbau von Synthesekapazitäten für die Herstellung von synthetischen Flüssigkraftstoffen etc.). Es ist grundsätzlich schwierig, die aufzubauende Infrastruktur und die damit einhergehenden CO₂-Emissionen den einzelnen Technologien zuzurechnen, da eine Infrastruktur in der Regel von einer Vielzahl an Nutzern verwendet wird. Die Berechnung der anteiligen Emissionen aus der (zusätzlichen) Infrastrukturbereitstellung ist entsprechend herausfordernd. Deswegen wird diese Stufe in der LCA-Literatur häufig außen vor gelassen und wir erfassen sie im Folgenden ebenfalls lediglich qualitativ.
- **Fahrzeugnutzung („Tank-to-Wheel“):** Dies umfasst alle CO₂-Emissionen, die direkt während der Nutzung des Fahrzeugs entstehen, in erster Linie die sogenannten Auspuffemissionen.
- **Entsorgung bzw. Recycling („End-of-Life“):** Die Entsorgungsphase nimmt die Emissionswirkungen in den Blick, die sich aus der Entsorgung des Fahrzeugs und der materiellen Teilprodukte ergeben. Durch potentielle Wiederverwendung, Rückgewinnung oder Recycling können in dieser Stufe ggf. auch negative CO₂-Beiträge entstehen und verrechnet werden.

Abbildung 3 CO₂-Emissionen entlang des Lebenszyklus



Quelle: Frontier Economics

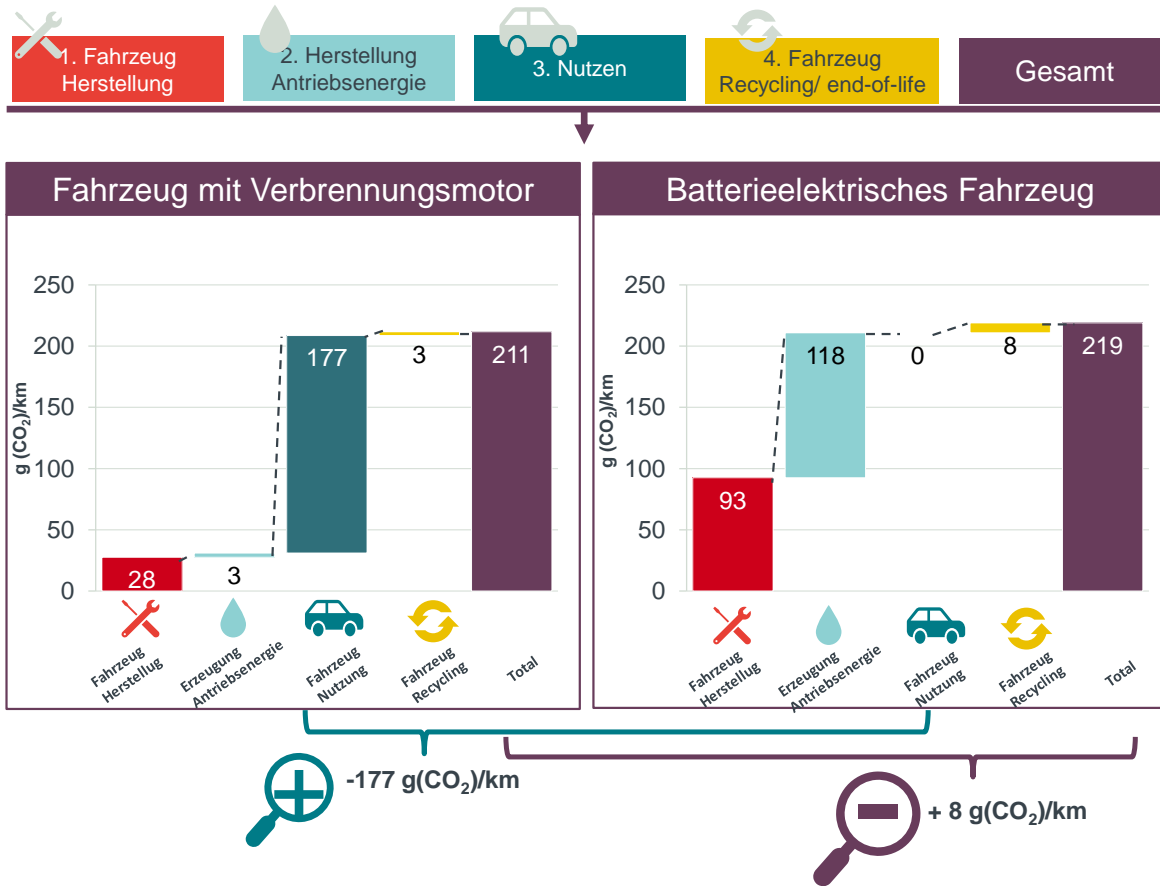
Hinweis: Hier nicht berücksichtigt sind zusätzliche CO₂-Emissionen für den Aufbau und Erhalt der Infrastruktur. So fallen bspw. für batterieelektrische Fahrzeuge in der Markthochlaufphase zusätzliche Emissionen für den Aufbau der Ladeinfrastruktur an.

In der Fachliteratur wie auch in verschiedenen Regulierungsfeldern (vgl. hierzu auch Abschnitt 5) hat sich deshalb der Ansatz der Lebenszyklusanalyse (LCA) zur Erfassung von CO₂-Emissionen durchgesetzt.

Abbildung 4 zeigt exemplarisch für die Beispielfahrzeuge²⁰ aus Abbildung 2 (TTW-Vergleich) den Vergleich der CO₂-Emissionen nach dem LCA-Ansatz. Hieraus wird deutlich, dass sich die Gegenüberstellung der CO₂-Bilanzen „Verbrenner vs. batterieelektrisches Fahrzeug“ durch eine ganzheitliche Betrachtung substantiell verändert: Vergleicht man nur die TTW-Emissionen, wie in dem Beispiel in der Abbildung 2, dann zeigt das BEV einen Vorteil auf, da dessen Emissionen hier um 177 g CO₂/km geringer sind als bei einem Fahrzeug mit Verbrennungsmotor. Bei einem LCA-Ansatz allerdings zeigt sich, dass für die Antriebssysteme insgesamt nahezu die gleichen Emissionen anfallen (Annahme: Einsatz eines herkömmlichen Kraftstoffs (E10)). Die Vergleichswerte ändern sich also substantiell durch den Übergang von einem TTW auf einen LCA-Ansatz.

²⁰ Informationen zu den Fahrzeugen sind im Hinweis unter der Abbildung angegeben.

Abbildung 4 Illustration: Vergleich der CO₂-Emissionen eines ICEVs und BEVs während eines Lebenszyklus (Beispielrechnung)



Quelle: Darstellung aus Frontier Economics (2019), Aktualisierung der Annahmen und Daten im Juli 2023

Hinweis: Fahrzeugtyp: Mittelklasse, Jahr der Anschaffung: 2022, Nutzungsdauer: 10 Jahre, Jahresleistung: 15.000km, Kraftstoff: Benzin (10% Beimischung, E10), Betriebsland: Deutschland, Herstellungsemissionen Batterie (z.B. in China): 140 kg CO₂e/kWh Batteriekapazität, dynamisch

Für beide Antriebssysteme, sowohl für das batterieelektrische Fahrzeug als auch für einen Verbrennungsmotor, der mit flüssigen Kraftstoffen angetrieben wird, fallen auf absehbare Zeit CO₂-Emissionen auf verschiedenen betrachteten Stufen an. Diese unterscheiden sich aber insbesondere auf folgenden Stufen:

- (a) **Fahrzeugherstellung:** Bei der Herstellung für ein Fahrzeug wird CO₂ emittiert. Hierbei liegen die CO₂-Emissionen für ein BEV höher als die eines Verbrenners. Der Haupttreiber für den Unterschied sind vor allem die höheren Energiekosten für die Produktion von Batterien. Im illustrativem Beispiel wird angenommen, dass die

Batterieherstellung in China erfolgt – derzeit stammen rund 80% der weltweit verbauten Batterien aus Fabrikanlagen in China.²¹

- (b) **Erzeugung der Antriebsenergie (WTT):** Solange fossile Energieträger anteilig für die Herstellung von Ladestrom genutzt werden, fallen auf dieser Produktstufe signifikante CO₂-Emissionen an. Bei der Herstellung von fossilem Diesel bzw. Benzin wird dagegen verhältnismäßig wenig CO₂ emittiert. Zukünftig werden die Emissionen auf dieser Stufe sinken: Da der Strommix zukünftig einen höheren Anteil an erneuerbaren Energien und anderen CO₂-neutralen Technologien aufweisen wird, ist davon auszugehen, dass die derzeit signifikanten WTT CO₂-Emissionen für ein batterieelektrisches Fahrzeug sinken werden. Für Fahrzeuge mit Verbrennungsmotor, die mit CO₂-neutralen Kraftstoffen²² betrieben werden, wird der Effekt bilanziell gesehen „negativ“, weil diese Kraftstoffe unter Nutzung von natürlichen (biobasierten) oder technischen CO₂-Quellen (z.B. Carbon Capture-Technologien) hergestellt werden und somit wie „CO₂-Senken“ wirken (siehe folgender Punkt c).
- (c) **Fahrzeugnutzung (TTW):** Wie bereits oben erwähnt, unterscheiden sich die CO₂-Emissionen besonders bei der Nutzung des Fahrzeugs. Während ein batterieelektrisches Fahrzeug keine CO₂-Emissionen während der Nutzung emittiert, verursacht ein Fahrzeug mit Verbrennungsmotor, in dem flüssige Kraftstoffe eingesetzt werden, den größten Anteil an CO₂-Emissionen auf dieser Stufe. Mit zunehmendem Einsatz CO₂-neutraler Kraftstoffe (Biokraftstoffe, synthetische Kraftstoffe aus erneuerbarem Strom etc.), werden die CO₂-Emissionen am Auspuff physikalisch nicht reduziert.

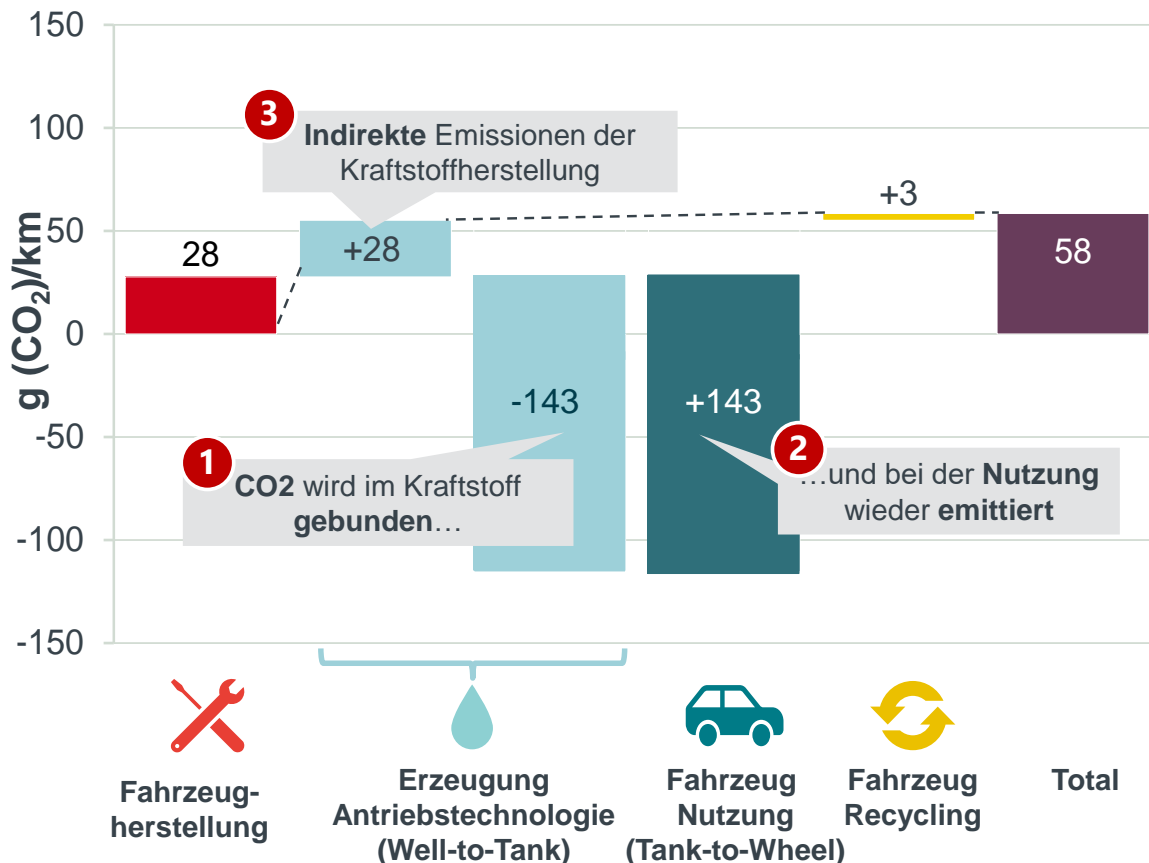
Allerdings ist, wie unter b) beschrieben, bilanziell die Entnahme von Kohlenstoff aus der Atmosphäre bei der Herstellung der Kraftstoffe entgegen zu rechnen (Stufe Well-to-Tank, WTT). Diese CO₂-Reduktion in der Atmosphäre geht bei Biokraftstoffen auf die Photosyntheseprozesse der in den Kraftstoffen verarbeiteten Pflanzen bzw. deren Pflanzenprodukte zurück, bei synthetischen Kraftstoffen aus erneuerbarem Strom (E-Fuels) auf die direkte Gewinnung von CO₂ aus der Atmosphäre (Direct Air Capture) oder die Abscheidung von CO₂ aus Abgasen, die ansonsten in die Atmosphäre gelangt wären (z.B. aus industriellen Prozessen wie der Zementproduktion). Die Klimawirksamkeit der Emissionen am

²¹ Vgl. Popien et al. (2023a).

²² Die den Berechnungen zugrundeliegenden Annahmen für die Beimischung von CO₂-neutralen Kraftstoffen entsprechen grundsätzlich denen, die im LCA-Modell von Frontier 2019 verwendet wurden. Diesem Ansatz unterliegt die Annahme, dass den fossilen Kraftstoffen stellvertretend für die Gruppe der CO₂-neutralen Kraftstoffe E-Fuels beigemischt bzw. E-Fuels verwendet werden. Die Beimischung bzw. Verwendung von HVO, Bioethanol oder anderer CO₂-neutraler Kraftstoffe werden in dieser Kurzstudie nicht separat analysiert. Diese Herangehensweise ist als konservativ zu bewerten, da die Emissionen, die bspw. laut EU WTW JEC Studie (siehe Prussi et al. (2020)) für HVO ausgewiesen werden, unter den von uns modellierten (indirekten) CO₂-Emissionen der Herstellung von E-Fuels liegen.

Auspuff (TTW) wird also bei CO₂-neutralen Kraftstoffen durch Negativemissionen bei der Kraftstoffherstellung (WTT) kompensiert (vgl. Abbildung 5).

Abbildung 5 Illustration: CO₂-Emissionen eines ICEVs mit CO₂-neutralem Kraftstoff während eines Lebenszyklus (Beispielrechnung)



Quelle: Darstellung aus Frontier Economics (2019), Aktualisierung der Annahmen und Daten im Juli 2023

Hinweis: Fahrzeugtyp: Mittelklasse, Jahr der Anschaffung: 2022, Nutzungsdauer: 10 Jahre, Jahresleistung: 15.000km, Kraftstoff: Klimadiesel90, Betriebsland: Deutschland/EU, dynamisch. Die CO₂-Emissionen der WTT und TTW Stufe gleichen sich nicht vollständig aus, da auch für die Erzeugung von Klimadiesel90 Restemissionen anfallen.

- (d) Die ganzheitliche Betrachtung ist allerdings nicht nur sinnvoll, um verschiedene Antriebstechnologien miteinander, sondern auch **um gleiche Antriebstechnologien unterschiedlicher Hersteller** (z.B. zwei batterieelektrische Fahrzeuge) untereinander zu vergleichen. Angenommen es gäbe zwei Autohersteller: (i) Autohersteller A produziert seine Batterien in der EU mit einem Strommix mit relativ hohem Anteil an erneuerbaren Energien, oder (ii) Autohersteller B produziert seine Batterien außerhalb der EU mit einem Strommix mit einem hohen Anteil an fossilen Energien. Findet ein Vergleich nun nur auf der TTW-Ebene statt, haben beide CO₂-Emissionen von null, obwohl Autohersteller A einen größeren Beitrag zu den Klimaschutzziele leistet. Erst ein Blick auf die LCA-

NOTWENDIGKEIT EINER LEBENSZYKLUSANALYSE IN DER FLOTTENREGULIERUNG

Emissionen würde den Unterschied in den batteriebezogenen Emissionen aufzeigen.

Wie in Abschnitt 2 erläutert muss die Kommission laut Artikel 7a der Verordnung (EU) 2023/851 bis Ende 2025 eine Methodik zur Erfassung von LCA-Emissionen vorlegen. Fahrzeughersteller haben laut Absatz 3 desselben Artikels die Möglichkeit, auf Freiwilligenbasis entsprechende LCA Daten zur Verfügung zu stellen. Dieser Artikel hat jedoch keine Auswirkung auf die Zielsetzung der Flottenregulierung im Rahmen des TTW-Ansatzes. Besteht nämlich weiterhin die Vorgabe, dass die TTW-Emissionen Null betragen müssen, bedeutet dies weiterhin ein faktisches Verbot von Fahrzeugen mit Verbrennungsmotoren. Bei Verwendung von CO₂-neutralen Flüssigkraftstoffen wird deren Klimaneutralität und damit ihr Beitrag zu den Klimaschutzzieleen erst durch eine Erfassung der Negativemissionen auf der WTT-Ebene erkennbar.

4 Der Fokus auf TTW-Emissionen verzerrt die Beurteilung der CO₂-Emissionen von Antriebstechnologien

Bei Verwendung eines LCA-Ansatzes wird deutlich, dass die Vorteilhaftigkeit unterschiedlicher Antriebstechnologien bezüglich der Klimawirksamkeit vom Einzelfall abhängt. Die unter Verwendung eines TTW-Ansatzes suggerierte pauschale CO₂-Neutralität von batterieelektrischen Fahrzeugen und damit Vorteilhaftigkeit bzgl. der Klimawirksamkeit ist dagegen nicht sachgerecht.

In diesem Abschnitt zeigen wir, dass der Fokus auf TTW-Emissionen die Beurteilung unterschiedlicher Antriebstechnologien bezüglich Ihrer Klimawirkung verzerrt und zu falschen Schlussfolgerungen führen kann, basierend auf

- (a) eigenen beispielhaften Berechnungen (Abschnitt (b) 4.1); sowie
- (b) Analysen der EU-Kommission, die im Rahmen des Impact Assessment zur Überarbeitung der Flottenregulierung erstellt wurden (Abschnitt 4.2).

4.1 Unter Verwendung eines LCA-Ansatzes wird deutlich, dass keine eindeutigen Aussagen zur klimapolitischen Vorteilhaftigkeit von Antriebstechnologien getroffen werden können

Die Klimawirksamkeit einzelner Antriebstechnologien und Fahrzeuge hängt unter Verwendung eines LCA-Ansatzes von einer Vielzahl von Faktoren ab. Die CO₂-Emissionen auf den verschiedenen Stufen des Lebenszyklus²³ sind dementsprechend einzelfallabhängig und letztlich in ihrer Gesamtheit zu betrachten, sowohl für batterieelektrische Fahrzeuge wie auch Fahrzeugen mit Verbrennungsmotoren.

Generelle Faktoren sind hierbei z.B.²³ (siehe auch Frontier Economics (2019)),

- (i) die Größe der Fahrzeuge;
- (ii) die technischen Spezifika der Fahrzeuge wie z.B. Motoreffizienz;
- (iii) die Fahrzeugnutzung (gefahrte Kilometer pro Jahr);
- (iv) die Lebens-/Nutzungsdauer eines Fahrzeuges;
- (v) das Fahrverhalten;
- (vi) äußere Faktoren, die den Energieverbrauch oder den Fahrzeugverschleiß beeinflussen wie Außentemperaturen, Topologie, etc.;

²³ Vgl. Frontier Economics (2019), Die CO₂-Gesamtbilanz für Antriebstechnologien im Individualverkehr heute und in Zukunft – Lebenszyklusanalysen als Basis für zielführende Klimapolitik und Regularien.

NOTWENDIGKEIT EINER LEBENSZYKLUSANALYSE IN DER FLOTTENREGULIERUNG

- (vii) die CO₂-Intensität der Herstellung der Fahrzeuge bzw. der Fahrzeugkomponenten, die vom jeweiligen Produktionsstandort und der eingesetzten Technologie abhängen.

Weitere wesentliche Treiber der CO₂-Emissionen für **batterieelektrische Fahrzeuge** sind v.a.

- (i) die CO₂-Intensität des zugrunde gelegten Strommixes für die Erzeugung des Ladestroms;
- (ii) die CO₂-Intensität der Herstellung der Batterien, die wiederum von der chemischen Zusammensetzung der Batterie, vom Energie- bzw. Strommix des Herstellerlandes, sowie der verwendeten Produktionstechnologien und dem industriellen Maßstab der Fertigung abhängt;
- (iii) die Speicherkapazität der verbauten Batterien,

Ein wesentlicher Treiber der CO₂-Emissionen bei **Fahrzeugen mit Verbrennungsmotoren** ist

- (i) der Beimischungsanteil von CO₂-neutralen Kraftstoffen zum fossilen Kraftstoff, der bis zu 100% betragen kann.

In der Abbildung 6 fassen wir eigene Berechnungen zu LCA CO₂-Emissionen eines PKWs der Mittelklasse bei Variation ausgewählter Treiber zusammen. Hierbei stützen wir uns auf das Frontier-Modell zur Berechnung von Lebenszyklusemissionen von PKW, das wir im Jahr 2019 im Rahmen der Studie *Die CO₂-Gesamtbilanz für Antriebstechnologien im Individualverkehr heute und in Zukunft – Lebenszyklusanalysen als Basis für zielführende Klimapolitik und Regularien*²⁴ entwickelt haben. Für die Berechnungen haben wir im Vergleich zu 2019 folgende wesentliche Annahmen aktualisiert:

- (a) Annahmen zur CO₂-Intensität des Strommixes zur Herstellung von Ladestrom in der EU und in Deutschland: Sowohl für Deutschland als auch für die EU haben wir die uns vorliegenden aktuellsten Werte verwendet.²⁵
 - (i) **Für den EU-Durchschnitt** haben wir dieselbe Trendentwicklung der CO₂-Intensität der Stromerzeugung über die Zeit bis zum Jahr 2050²⁶ wie in der Studie 2019 angenommen, allerdings wurde das Ausgangsniveau auf den neuesten offiziellen Wert nach unten korrigiert.

²⁴ Siehe Frontier Economics (2019).

²⁵ Für die EU siehe EEA (2023), für Deutschland siehe Umweltbundesamt (2023), sowie die Langfristszenarien des BMWK (siehe Fraunhofer ISI (2022)) für die Prognose (abgerufen am 12. Juli 2023).

²⁶ Hinweis: Für das betrachtete Beispiel, legen wir ein Fahrzeug zugrunde, welches im Jahr 2022 hergestellt wird und dessen Lebensdauer 10 Jahre beträgt. Der Strommix ist demnach für diesen Fall nur bis einschließlich 2032 für die Berechnung relevant.

- (ii) **Für den deutschen Strommix** betrachten wir drei unterschiedliche Pfade:
- (A) Pfad (A) beruht auf den Modellierungen der BMWK Langfristszenarien (TN45-Strom), die im Jahr 2035 im Einklang mit den Ausbauzielen der Bundesregierung für erneuerbare Energie unterstellen, dass der Strom zu 100% aus erneuerbaren Energien hergestellt wird.
 - (B) Im Pfad (B) verfolgen wir den gleichen Ansatz wie es für den EU-Durchschnitt unter (i) beschrieben wurde, d.h. die Entwicklung der CO₂-Intensität der Stromerzeugung entsprechen denen der Studie aus dem Jahr 2019, allerdings auf einem niedrigeren Niveau.
 - (C) In Pfad (C) nehmen wir an, dass das batterieelektrische Fahrzeug zu 100% mit erneuerbarem Strom geladen wird. Dies trifft allerdings nur auf Fahrzeuge zu, die beispielsweise ausschließlich mit Strom einer Solaranlage geladen werden.
- (c) Annahmen zur CO₂-Intensität der Herstellung von Batterien, die wir ebenfalls um aktuelle Werte ergänzt haben. Auch wenn der Strommix für die CO₂-Emissionen der Herstellung von Batterien einen geringeren Einfluss hat als in unserer Studie 2019 angenommen, variieren die CO₂-Emissionen bei der Batterieproduktion je nach Produktionsland und Batterieart bzw. chemischer Zusammensetzung. Beispielsweise können Lithium-Ionen-Batterien, die heutzutage vorwiegend verwendet werden, unterschiedlich zusammengesetzt sein, indem u.a. der Anteil von Nickel und Kobalt variiert.

Im Bereich der Kraftstoffe tragen wir der heutigen Situation Rechnung, dass zunehmend Kraftstoffe mit höheren Anteilen an CO₂-neutralen Kraftstoffen an Europas Tankstellen verfügbar sind. So sind seit Anfang 2023 an einer zunehmenden Anzahl von Tankstellen in Deutschland Dieselkraftstoffe mit höheren Anteilen an CO₂-neutralen Kraftstoffen erhältlich (siehe Annex A.1), in Frankreich etwa wird ein Benzinkraftstoff mit einem Ethanol-Anteil von 85% (E85) vertankt.²⁷ In den folgenden Berechnungen beziehen wir uns vor diesem Hintergrund beispielhaft auf Diesel- und Benzinkraftstoffe mit folgenden Spezifikationen:²⁸

- (a) Dieselkraftstoff mit einem Beimischungsanteil von 7% Biokraftstoff;

²⁷ Der Marktanteil des Kraftstoffs Superéthanol (E85) stieg in Frankreich im April 2022 sogar auf 6,2% und verdoppelte sich damit im Vergleich zum Jahr 2020. Vgl. Euroactiv (2022).

²⁸ Die den Berechnungen zugrundeliegenden Annahmen für die Beimischung von CO₂-neutralen Kraftstoffen entsprechen grundsätzlich denen, die im LCA-Modell von Frontier 2019 verwendet wurden. Diesem Ansatz unterliegt die Annahme, dass den fossilen Kraftstoffen stellvertretend für die Gruppe der CO₂-neutralen Kraftstoffe E-Fuels beigemischt bzw. E-Fuels verwendet werden. Die Beimischung bzw. Verwendung von HVO, Bioethanol oder anderer CO₂-neutraler Kraftstoffe werden in dieser Kurzstudie nicht separat analysiert. Diese Herangehensweise ist als konservativ zu bewerten, da die Emissionen, die bspw. laut EU WTW JEC Studie (siehe Prussi et al. (2020)) für HVO ausgewiesen werden, unter den von uns modellierten (indirekten) CO₂-Emissionen der Herstellung von E-Fuels liegen.

NOTWENDIGKEIT EINER LEBENSZYKLUSANALYSE IN DER FLOTTENREGULIERUNG

- (b) Dieseldieselmotoren mit einem Anteil von 33% CO₂-neutralen Kraftstoffs (in der Praxis derzeit v.a. HVO) – entspricht z.B. der Marke „Klimadiesel25“ (KD 25), d.h. einer CO₂ Emissionsminderung von 25% (unter Berücksichtigung indirekter Emissionen der Kraftstoffherstellung) gegenüber einem rein fossilen Kraftstoff;²⁹
- (c) Dieseldieselmotoren mit einem Anteil von 100% CO₂-neutralem Kraftstoffs³⁰ – entspricht der Marke „Klimadiesel90“ (KD 90), d.h. einer CO₂ Emissionsminderung von 90% (unter Berücksichtigung indirekter Emissionen der Kraftstoffherstellung) gegenüber einem fossilen Kraftstoff (in der Praxis derzeit v.a. HVO);
- (d) Benzindieselmotoren mit einem Beimischungsanteil von 5% Biokraftstoff (E5)
- (e) Benzindieselmotoren mit einem Beimischungsanteil von 10% Biokraftstoff (E10);
- (f) Benzindieselmotoren mit einem Anteil von 85% CO₂-neutralem Kraftstoffs (derzeit v.a. Ethanol-Kraftstoff) – entspricht der Bezeichnung E85 und wird bereits in Ländern wie Frankreich vertankt.
- (g) Benzindieselmotoren mit einem Anteil von 100% CO₂-neutralem Kraftstoffs – dieser wird aktuell noch nicht an Tankstellen angeboten und bildet somit ein hypothetisches bzw. zukünftiges Szenario ab. Dieser Kraftstoff kann großtechnisch erzeugt und technisch in Ottomotoren eingesetzt werden.

Das für die Berechnung der LCA CO₂-Emissionen ausgewählte Beispielfahrzeug weist folgende Charakteristik auf:

- (a) Generelle Charakteristik
 - (i) Fahrzeugtyp: Mittelklasse,
 - (ii) Jahr der Anschaffung: 2022,
 - (iii) Nutzungsdauer: 10 Jahre,
 - (iv) Jahresleistung: 15.000km,
 - (v) Betriebsregion: Deutschland oder EU
- (b) Spezifische Charakteristika für das batterieelektrische Fahrzeug sind:
 - (i) Strommix des Ladestroms: Deutschland oder EU-Durchschnitt.
 - (ii) Im Falle Deutschlands rechnen wir mit drei Szenarien für die Entwicklung der CO₂-Intensität des Strommixes bis zum Jahr 2032:
 - (A) Deutlich rückläufige CO₂-Intensität im Einklang mit den Ausbauzielen der Bundesregierung für Erneuerbare Energie (Anteil Erneuerbarer

²⁹ In Schweden besteht derzeit die Pflicht der Beimischung von Biodiesel in Höhe von 30%. Vgl. Euractiv (2023).

³⁰ Dieser Kraftstoff ist derzeit noch nicht im freien Verkauf, wird aber bereits an einen geschlossenen Kreis von Nutzern abgegeben. Der Grund ist, dass HVO 100 nur auf eine Dichte von 780 kg/m³ kommt, aber Dieseldieselmotoren laut gesetzlicher Vorschrift mindestens 800 kg/m³ aufweisen müssen. Von Befürwortern der HVO-Zulassung wird diese „bürokratische Vorschrift“ kritisiert. Siehe <https://www.arcd.de/detail/biokraftstoff-hilfestellung-fuer-verbrenner/>

Energien an der Stromerzeugung von 80% bis zum Jahr 2030) und einem beschleunigten Kohleausstieg;

- (B) Moderat rückläufige CO₂-Intensität im Einklang mit dem Trend, der in der unserer Studie von 2019 hinterlegt ist.³¹ Dieser Trend unterstellt, dass sich die mittelfristigen Ziele der Bundesregierung bezogen auf das Jahr 2035 in der energiewirtschaftlichen Praxis nicht bzw. nur teilweise umsetzen lassen.
- (C) Erneuerbarer Ladestrom: Hier wird angenommen, dass das Fahrzeug nicht mit dem deutschen Strommix lädt, sondern ausschließlich durch Strom aus Solaranlagen geladen wird.
- (iii) CO₂-Intensität der Batterieproduktion: Bandbreite zwischen 45 und 140 kg CO₂e pro kWh Speicherkapazität, die dem in der Fachliteratur hinterlegten Spektrum entspricht (vgl. McKinsey & Company (2023), Popien et al. (2023b) und Lai et al. (2023)). Hierbei entsprechen überschlägig 45 kg/kWh bspw. einer Batteriefertigung in Schweden, 75 kg/kWh einer Batteriefertigung in den USA.³² Die heute standardmäßig für BEV hergestellten Lithium-Ionen-Batterien liegen im Durchschnitt (je nach Typ und Produktion) zwischen 90 kg/kWh und 110 kg/kWh³³ und bis zu 140 kg/kWh bei einer durchschnittlichen Batteriefertigung in China³⁴.
- (c) Spezifische Charakteristika für ein Fahrzeug mit Verbrennungsmotor:
 - (i) Kraftstoff: Diesel, Benzin
 - (ii) Anteil CO₂-neutraler Kraftstoffe - Diesel: 7% (B7), 33% (KD 25), 100% (KD 90).
 - (iii) Anteil CO₂-neutraler Kraftstoffe - Benzin: 5% (E5), 10% (E10), 85% (E85)³⁵, 100% (heute noch nicht auf dem freien Markt erhältlich, aber grundsätzlich großtechnisch herstell- und in Ottomotoren einsetzbar).

³¹ Siehe Frontier Economics (2019).

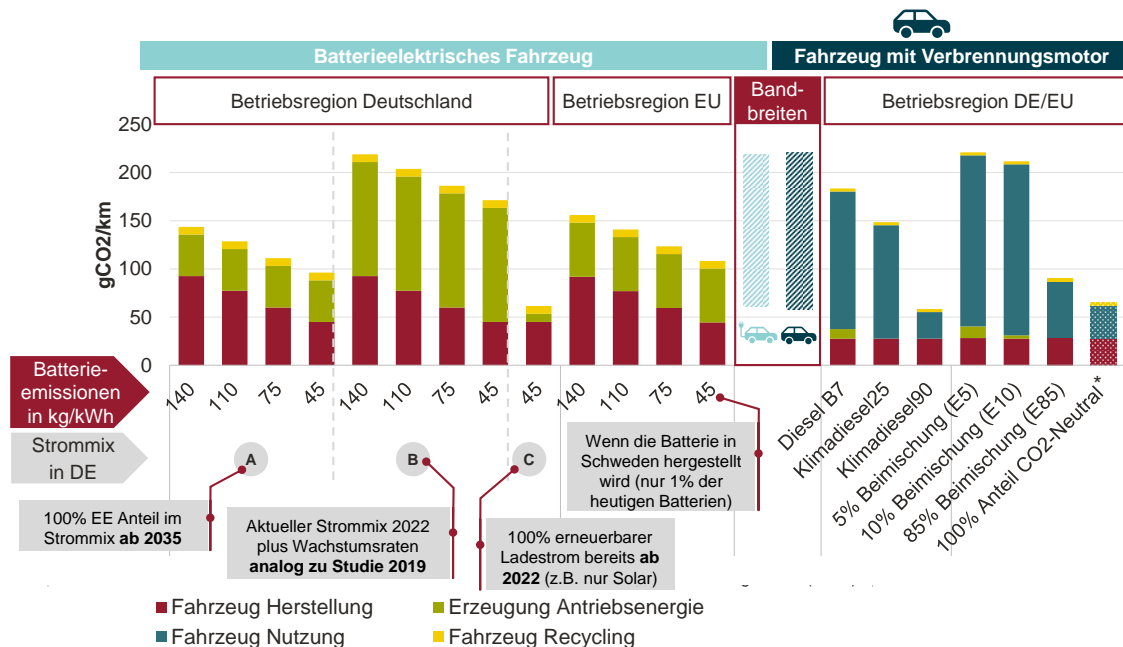
³² Vgl. McKinsey & Company (2023).

³³ Vgl. Popien et al. (2023b).

³⁴ Vgl. Lai et al. (2023) .

³⁵ Der Kraftstoff E85 besteht zu 15 % aus fossilem Benzin und bis zu 85 % aus Bioethanol. Im Vergleich zu einem rein fossilen Kraftstoff kommt E85 je nach pflanzlichem Rohstoff, aus dem der Bioethanol-Anteil gewonnen wird, auf eine CO₂-Emissionsminderung von ca. 63% bezogen auf die Lebenszyklusemissionen eines Fahrzeugs. Vgl. Bunse et al. (2022). Hierbei ist zu berücksichtigen, dass der Kraftstoff E85 einen Anteil von 15% an fossilem Kraftstoff enthält, d.h. Bioethanol selbst weist eine CO₂-Minderung von mehr als 70% gegenüber einem rein fossilen Kraftstoff auf. Dies entspricht in etwa der CO₂-Minderung von E-Fuels in unseren Berechnungen.

Abbildung 6 CO₂-Emissionen für ein Fahrzeug der Mittelklasse in verschiedenen Szenarien auf Basis einer Lebenszyklusanalyse (LCA)



Quelle: Frontier Economics (2023)

Hinweis: *Für Benzin wird ein Anteil von 100% CO₂-neutralem Kraftstoff noch nicht an den Tankstellen regulär angeboten, weshalb dieser Balken nur „gepunktet“ dargestellt wird.

Im Ergebnis zeigt sich unter Verwendung eines LCA-Ansatzes ein gemischtes Bild bezüglich der CO₂-Emissionswirkungen der Antriebstechnologien unter den verschiedenen Szenarien:

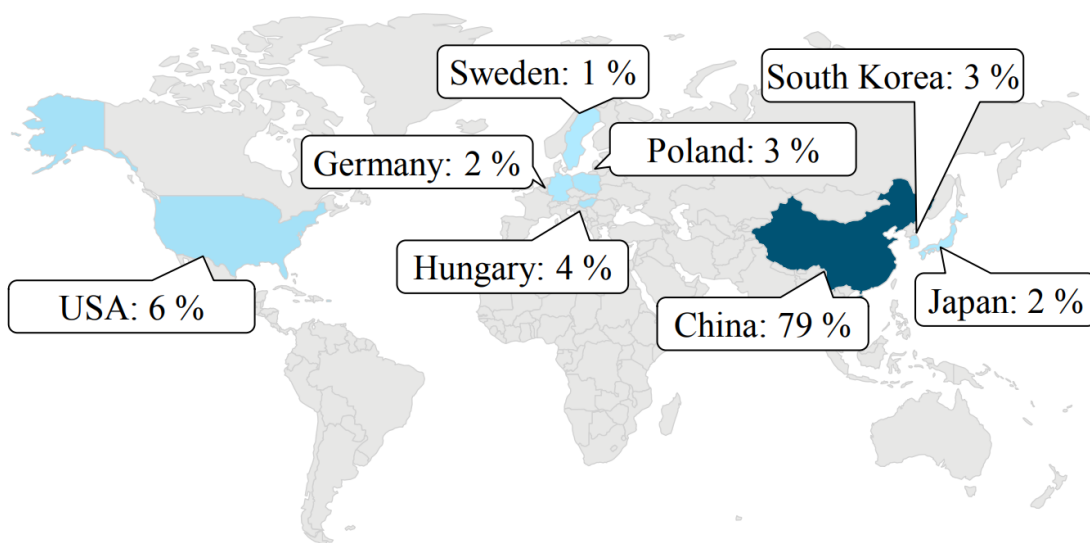
- (a) Unter hohen Anteilen von CO₂-neutralen Kraftstoffen wie Klimadiesel90 ist das Fahrzeug mit Verbrennungsmotor gegenüber dem batterieelektrischen Fahrzeug in allen Szenarien im Vorteil, in denen ein batterieelektrisches Fahrzeug mit Strom geladen wird, der die durchschnittliche CO₂-Intensität des Netzstroms aufweist. Ähnliche CO₂-Emissionswerte würde das batterieelektrische Fahrzeuge nur dann erreichen, wenn das Fahrzeug ausschließlich mit erneuerbarem Strom geladen würde, anstatt mit einem durchschnittlichen Strommix, und die Batterieherstellung in einem Land mit sehr niedrigen CO₂-Intensitäten (z.B. Schweden) stattfindet.
- (b) Die Bandbreite der möglichen LCA CO₂-Emissionen für die verschiedenen Szenarien überschneidet sich in weiten Teilen. Eine pauschale Aussage zur Vorteilhaftigkeit der Antriebssysteme (d.h. batterieelektrisch oder Verbrennungsmotor) lässt sich somit nicht treffen.

- (c) Auch innerhalb der batterieelektrischen Antriebstechnologie sind die Bandbreiten der LCA CO₂-Emissionen erheblich. Diese Variationen entstehen insbesondere auf den Stufen der Herstellung oder der Energieerzeugung (WTT) und würden durch einen TTW-Ansatz zur Bestimmung von CO₂-Emissionen nicht erfasst.

Gegen die obige Betrachtung ließe sich der Einwand erheben, dass klimafreundliche Kraftstoffspezifikationen wie KD90 bzw. KD25 heute in nur sehr begrenzten Mengen genutzt werden. Dies ist allerdings für die Frage, ob ein LCA oder TTW-Ansatz zur Erfassung von CO₂-Emissionen im Regulierungsrahmen sachgerecht ist, unerheblich. Klimapolitisch ist hier alleine von Bedeutung, dass diese Technologien grundsätzlich verfügbar sind und sich dementsprechend perspektivisch im Markt auch durchsetzen können, wenn sich diese unter Berücksichtigung der Wirtschaftlichkeit als vorteilhaft erweisen.

Zudem ist zu berücksichtigen, dass auch auf Seiten des batterieelektrischen Fahrzeugs rückläufige CO₂ Emissionswerte nur dann erreicht werden, wenn die CO₂-Intensität des Strommixes rückläufig ist und sich v.a. auch die CO₂-Intensität der Batterieherstellung verringert. Derzeit wird allerdings (noch) ein Großteil der global hergestellten Batteriezellen in der Volksrepublik China gefertigt (Abbildung 7). Auch hier gilt, analog zu CO₂-neutralen Kraftstoffen, dass die CO₂-Minderung ein dynamischer Prozess ist und in weiten Teilen erst noch in der Zukunft erbracht werden muss. Ein alleiniger Fokus auf die TTW Stufe setzt jedoch keinerlei Anreize, den ausstehenden Beitrag zum Klimaschutz noch zu erbringen, indem etwa Batteriehersteller gesucht und belohnt werden, die auf CO₂ sparende Herstellungsmethoden abstellen.

Abbildung 7 Durchschnittliche Produktionsanteile für Batteriezellen



Quelle: Popien et al. (2023a)

4.2 Auch aus Berechnungen der EU-Kommission lässt sich ableiten, dass Verbrenner mit CO₂-neutralen Kraftstoffen eine bessere CO₂-Bilanz aufweisen können als Elektrofahrzeuge

Im Rahmen des Impact Assessment zur Reform der Flottenregulierung³⁶ hat die EU-Kommission die Ergebnisse der in Auftrag gegebenen Studie von Ricardo Energy & Environment³⁷ zur Klimabilanz unterschiedlicher Antriebsarten diskutiert und bewertet.

Es ist festzustellen, dass beispielsweise CO₂-neutrale Kraftstoffe nicht explizit in den Technologievergleich aufgenommen wurden, da laut den Studienautoren die Datenlage unzureichend und daher die Ergebnisse mit sehr hoher Unsicherheit behaftet seien. Interpretiert man jedoch die Ergebnisse richtig und berücksichtigt 100% CO₂-neutrale Kraftstoffe (wie in Abbildung 8), so geht aus den Ergebnissen hervor, dass Verbrennungsmotoren mit CO₂-neutralen Kraftstoffen weniger Emissionen verursachen würden als batterieelektrische Fahrzeuge (BEV), selbst wenn der Strommix zu 100 % aus erneuerbaren Energiequellen bestünde (was europaweit nicht vor 2040 zu erwarten ist). Zudem zeigt sich, dass – entgegen der Behandlung in der Flottenregulierung –

³⁶ Siehe Europäische Kommission (2021b).

³⁷ Siehe Europäische Kommission (2020a)

batterieelektrische Fahrzeuge höhere CO₂-Emissionen bei der Fahrzeugherstellung aufweisen.

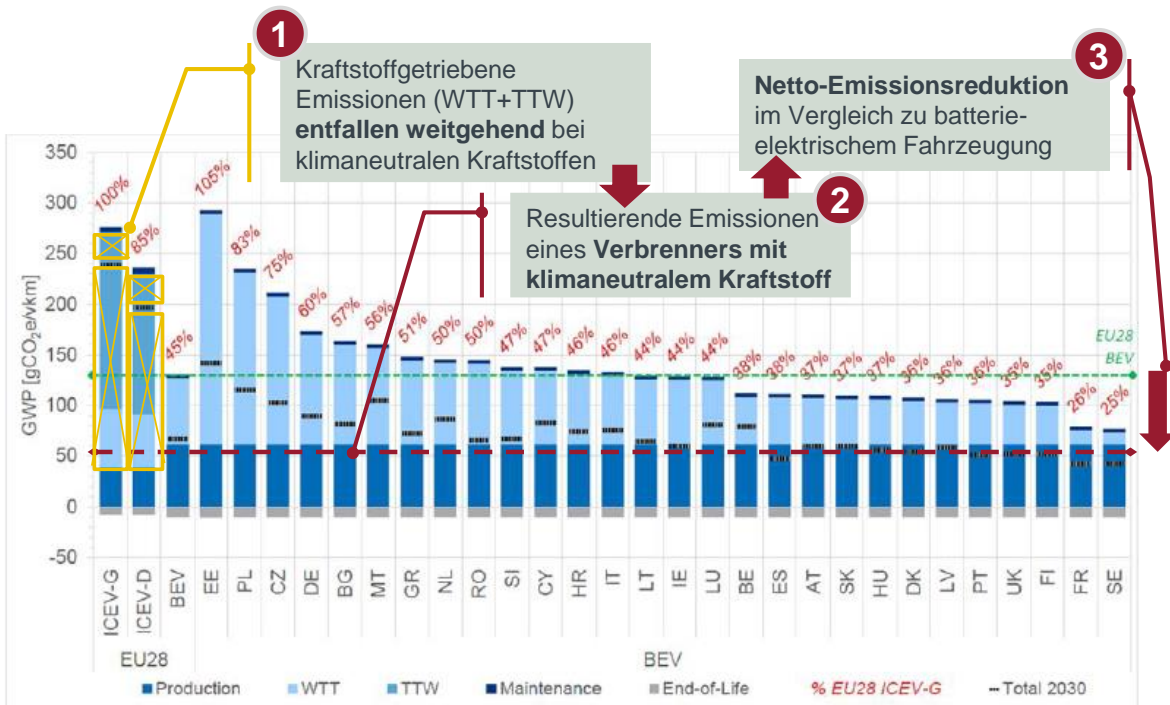
Diese Aussagen lassen sich wie folgt ableiten:

- (a) Die Ergebnisse der Kommission (Abbildung 8) gehen bei Fahrzeugen mit Verbrennungsmotoren von weitestgehend fossilen Kraftstoffen aus. Berücksichtigt man im ersten Schritt CO₂-neutrale Kraftstoffe, so beträgt die kraftstoffbezogene Emissionsbilanz von Herstellung (WTT) und Nutzung (TTW) einen geringen Anteil der ursprünglichen „Well-to-Wheel“ (WTW).
- (b) WTW fasst die Emissionen der Stufen WTT und TTW zusammen.³⁸ Die resultierenden Netto-CO₂-Emissionen im zweiten Schritt liegen somit deutlich unter den ursprünglichen Emissionen für fossile Kraftstoffe.³⁹ (Nr. 2 in der Abbildung 8).
- (c) Im Vergleich zu batterieelektrischen Fahrzeugen (BEV) bei einem durchschnittlichen Strommix für die EU-28 (grüne Linie) zeigt sich im dritten Schritt eine deutliche Emissionseinsparung.

³⁸ Grund hierfür ist die nahezu CO₂-neutrale Produktion synthetischer Kraftstoffe. Die Emissionen, die auf der TTW Stufe ausgestoßen werden, werden zuvor in der WTT Stufe der Atmosphäre entnommen. Die so auf der WTT Stufe generierten Negativemissionen gleichen die TTW Emissionen entsprechend aus. Dennoch beträgt der CO₂ Fußabdruck bei einer LCA Perspektive nicht exakt null, solange die Errichtung und der Betrieb der Erneuerbare-Energien-Anlagen sowie der Umwandlungsanlagen nicht komplett klimaneutral geschieht. Der entsprechende CO₂-Rucksack der Anlagen ist entsprechend zu berücksichtigen.

³⁹ Die eingezeichnete Linie dient lediglich der Illustration der sich grob ergebenden Größenordnung und beruht im Gegensatz zum vorherigen Abschnitt nicht auf eigenen Modellierungen.

Abbildung 8 Vergleich der LCA-Emissionen für ein unteres Mittelklasse-Fahrzeug (CO₂-neutrale Kraftstoffe ergänzt)



Quelle: Europäische Kommission (2020a), Figure ES5, bzw. Europäische Kommission (2021b), Figure 39 (ergänzt durch Frontier Economics).

Hinweis: BEV = Batterieelektrisches Fahrzeug, ICEV = Fahrzeugung mit Verbrennungsmotor, WTT = Well-to-Tank (Emission der Kraftstoff-/Stromherstellung), TTW = Tank-to-Wheel (Emissionen während der Nutzungsphase bzw. Auspuffemissionen, keine Emissionen bei rein elektrisch angetriebenen Fahrzeugen)

Die Auswertung der Berechnungen der EU-Kommission im Hinblick auf den Einsatz CO₂-neutraler Kraftstoffe bestätigt das Ergebnis unserer eigenen Berechnungen aus Abschnitt 4.1, dass mit CO₂-neutralen Kraftstoffen betriebene Fahrzeuge mit Verbrennungsmotoren geringere CO₂-Lebenszyklusemissionen aufweisen können als batterieelektrische Fahrzeuge gleichen Typs. Damit bestätigt sich, dass pauschale Aussagen zur Vorteilhaftigkeit von Antriebstechnologien nicht sachgerecht sind, sondern dass es vielmehr auf den entsprechenden Einzelfall ankommt (bspw. ob die Kraftstoffe CO₂-neutral oder fossil sind).

Diese einfachen Illustrationen zeigen, dass regulatorische Vorgaben, wie die Verordnung (EU) 2023/851, auf einer LCA-Perspektive aufbauen sollten, die reale klimawirksame Emissionen verschiedener Antriebslösungen bewertet. Dagegen verschleiert ein TTW-Ansatz aufgrund der Kennzeichnung bestimmter Fahrzeuge als emissionsfrei die tatsächlichen Emissionen. Die Verordnung 2023/851 legt ausschließlich den TTW-Ansatz zugrunde, womit die Überlegungen zum LCA-Ansatz nicht auf den Inhalt der Vorgaben durchschlagen.

5 LCA-Ansatz setzt sich in der Fachliteratur und Regulierung zunehmend durch

5.1 Die Verwendung von Lebenszyklusanalysen ist in der Fachliteratur heute Standard

In der Fachliteratur zur Analyse von CO₂-Emissionen im Straßenverkehrssektor hat sich die Anwendung von Lebenszyklusmethoden mittlerweile als Standard etabliert. Im Rahmen einer Meta-Analyse haben wir im Jahr 2020 85 internationale Studien aus den vorangegangenen 15 Jahren identifiziert, die Lebenszyklusanalysen der CO₂-Emissionen von Antriebstechnologien für Personenkraftwagen untersucht haben.⁴⁰ Insgesamt sind die einzelnen Studienergebnisse szenarioabhängig; aber in der Grundaussage lassen die Studien keinen Zweifel an der Notwendigkeit erkennen, bei der CO₂-Bilanzierung den LCA-Ansatz anzuwenden.

Aufgrund der fortschreitenden Entwicklung innovativer Antriebstechnologien wächst die Fachliteratur zu CO₂-Emissionen im Straßenverkehr kontinuierlich weiter an. Auch die uns bekannten jüngeren Studien verwenden dabei vorwiegend Lebenszyklusmethoden.⁴¹

5.2 LCA-Ansätze haben sich auch bereits in der Regulierung etabliert

Auch in einer zunehmenden Anzahl von Regulierungsbereichen wird auf die Anwendung von Lebenszyklusanalysen zur Bestimmung der CO₂-Emissionsintensität von Technologien und Anwendungen referenziert.

Bereits im Jahr 2020 weist die sogenannte Taxonomieverordnung (Verordnung (EU) 2020/852)⁴² darauf hin, dass bei der Prüfung der umweltbezogenen Auswirkungen von Wirtschaftstätigkeit auf Umweltziele über die Tätigkeit hinaus der Lebenszyklus der durch die Tätigkeit bereitgestellten Güter und Dienstleistungen berücksichtigt werden soll.⁴³

Im April des Jahres 2023 wurde dann im Rahmen der Änderungsverordnung (EU) 2023/851 festgelegt, dass eine gemeinsame Unionsmethode zur Bewertung und Meldung der CO₂-Emissionen über den gesamten Lebenszyklus von Personenkraftwagen und leichten Nutzfahrzeugen zu entwickeln sei.⁴⁴

⁴⁰ Siehe Frontier Economics (2020), Cradle-to-Grave-Lebenszyklusanalyse im Mobilitätssektor - Metastudie zur CO₂-Bilanz alternativer Fahrzeugantriebe.

⁴¹ Vgl. z.B. Degen und Schütte (2022), Popien et al. (2023a), Lai et al. (2023) und McKinsey & Company (2023).

⁴² Verordnung (EU) 2020/852, eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:32020R0852

⁴³ Verordnung (EU) 2020/852, eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:32020R0852, RZ. 34.

⁴⁴ Verordnung (EU) 2023/851, <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:32023R0851>, RZ. 33-34

Im Februar 2023 hat die EU-Kommission zudem zwei Delegierte Rechtsakte in ihre Renewable Energy Directive aufgenommen. Der erste Delegierte Rechtsakt definiert die Kriterien für die Herstellung von erneuerbaren Brenn- bzw. Kraftstoffen nicht-biogenen Ursprungs (RFNBO) in Bezug auf die Zusätzlichkeit sowie die zeitliche und geographische Korrelation der erneuerbaren Strom- und Wasserstoffherzeugung.⁴⁵ Der zweite Delegierte Rechtsakt schreibt vor, dass zur Bestimmung der THG-Einsparungen von RFNBO die gesamten Emissionen entlang des Lebenszyklus des Kraftstoffs zu berücksichtigen sind.⁴⁶ Diese beinhalten u.a.

- (a) die mit der Kraftstoffherstellung verbundenen Upstream-Emissionen,
- (b) die Emissionen durch einen Netzstrombezug, sowie
- (c) die Emissionen der Verarbeitung, des Transports und der Verwendung des Kraftstoffs beim Endverbraucher,
- (d) abzüglich der Emissionseinsparungen durch die Abscheidung und geologische Speicherung von CO₂.

Im Ergebnis reflektieren diese Vorgaben einen LCA-Ansatz für die Erfassung der CO₂-Emissionen von RFNBO im Rahmen der Regulierung, während in den Flottenzielen weder Grünstromkriterien noch eine Methodik für Lebenszyklusemissionen angewendet werden.

Dabei hatte die EU-Kommission selbst die Nutzung von Lebenszyklusanalysen zur Bewertung der THG-Emissionen von konventionellen und alternativ betriebenen Fahrzeugen in Betracht gezogen. So ist in den Verordnungen zur Festlegung von CO₂-Emissionsnormen für Personenkraftwagen und leichte Nutzfahrzeuge⁴⁷ und für schwere Nutzfahrzeuge⁴⁸ aus den Jahren 2019 vorgesehen, dass die Emissionen von solchen Fahrzeugen, die in der Union in den Verkehr gebracht werden, über den gesamten Lebenszyklus bewertet werden müssen. Dazu sollte die Kommission bis zum Jahr 2023 die Möglichkeit prüfen, eine entsprechende Methodik zu entwickeln und geeignete Folgemaßnahmen und ggf. Legislativvorschläge zu unterbreiten.⁴⁹ Dieses Vorhaben wurde mit der angepassten Verordnung (EU) 2023/851 vom 19. April 2023 zur Änderung der Verordnung (EU) 2019/631 im Hinblick auf eine Verschärfung der CO₂-Emissionsnormen für neue Personenkraftwagen und für neue leichte Nutzfahrzeuge⁵⁰ auf den 31. Dezember 2025 verschoben, vgl. auch Ausführungen in Abschnitt [2].

⁴⁵ Delegierter Rechtsakt zur Richtlinie (EU) 2018/2001, https://energy.ec.europa.eu/system/files/2023-02/C_2023_1087_1_EN_ACT_part1_v8.pdf

⁴⁶ Anhang zum Delegierten Rechtsakt zur Richtlinie (EU) 2018/2001, https://energy.ec.europa.eu/system/files/2023-02/C_2023_1086_1_EN_annexe_acte_autonome_part1_v4.pdf

⁴⁷ Verordnung (EU) 2019/631, <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:32019R0631>

⁴⁸ Verordnung (EU) 2019/1242, <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:32019R1242&qid=1689162171924>

⁴⁹ Verordnung (EU) 2019/631 und 2019/1242, Art. 15 Para. 2.

⁵⁰ Verordnung (EU) 2023/851, <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:32023R0851>

Im Jahr 2017 wurde von DG Klima eine Studie beauftragt, die einen Lebenszyklusansatz für den Straßentransportsektor entwickeln und für exemplarische Fahrzeugkategorien, Antriebstechnologien und Kraftstoffe anwenden sollte.⁵¹ Die Kommission kommt aber 2021 letztlich zu dem Schluss, dass die im Rahmen der Studie entwickelte Methodik nur bedingt für die Berechnung individueller Lebenszyklusemissionen einzelner Fahrzeuge geeignet ist.⁵² Hingewiesen wird insbesondere lediglich auf die Notwendigkeit eines noch detaillierteren und komplexeren Ansatzes.⁵³ Die Anwendung des LCA-Ansatzes in unterschiedlichen Bereichen der europäischen Regulierung sowie in Bezug auf die globalen THG-Bilanzierungsstandards sowie die große Anzahl von LCA Analysen zu Emissionen von Kraftfahrzeugen spricht allerdings dafür, dass auch im Rahmen der Flottenregulierung ein LCA-Ansatz grundsätzlich in der Praxis umsetzbar sein kann.

Zudem bestätigt die von der EU-Kommission beauftragte Studie, dass letztlich nur mittels eines Lebenszyklusansatzes ein sinnvoller Vergleich verschiedener Fahrzeugtechnologien und Kraftstoffe erfolgen kann.⁵⁴ Zwar kommt die Studie zu dem Ergebnis, dass batterieelektrisch betriebene Fahrzeuge aktuell und zukünftig die geringsten Lebenszyklusemissionen der untersuchten Fahrzeugtechnologien aufweisen.⁵⁵ Die Autoren benennen aber auch die Limitationen der durchgeführten Analysen. So wurden beispielsweise E-Fuels nicht explizit in den Technologievergleich aufgenommen, da die Datenlage unzureichend und daher die Ergebnisse mit sehr hoher Unsicherheit behaftet seien.⁵⁶ Die Autoren weisen daher explizit darauf hin, dass die Studienergebnisse keine definitive Bewertung der relativen Umweltauswirkungen der verschiedenen Brennstoffketten erlauben.⁵⁷ Sie empfehlen daher sowohl eine Verbesserung der Datengrundlage für innovative Brennstoffproduktionsverfahren wie E-Fuels, als auch der Berechnungsmethoden, um so eine bessere Vergleichbarkeit der Brennstoffketten herzustellen.⁵⁸

Auch auf globaler Ebene und über den Transportsektor hinaus finden LCA-Methoden eine immer größere Anwendung. In der europäischen Regulierung spielen LCA-Ansätze schon seit den 1990er Jahren eine Rolle.⁵⁹ Erstmals wurde das Konzept der Berücksichtigung von Umweltauswirkungen über den gesamten Lebenszyklus von Produkten „von der Wiege bis zur Bahre“ in der Verordnung (EWG) Nr. 880/92 zur Vergabe eines Umweltzeichens für

⁵¹ Für die Studie wurde Ricardo Energy & Environment beauftragt. Der abschließende Bericht *Determining the environmental impacts of conventional and alternatively fuelled vehicles through LCA* wurde im Juli 2020 fertiggestellt und veröffentlicht. Siehe Europäische Kommission (2020).

⁵² Vgl. Europäische Kommission (2021b), S. 100.

⁵³ Vgl. Europäische Kommission (2021b), S. 100.

⁵⁴ Vgl. Europäische Kommission (2020a), S. 6.

⁵⁵ Ibid., Seite 11.

⁵⁶ Ibid., Seite 190.

⁵⁷ Ibid., Seite 196.

⁵⁸ Ibid., Seite 206.

⁵⁹ Vgl. Sala et. al (2021).

saubere Produkte verankert.⁶⁰ Auch die Richtlinie 2005/32/EG zur Schaffung eines Rahmens für die Festlegung gemeinschaftlicher Ökodesign-Anforderungen für energiebetriebene Produkte definiert die Umweltauswirkungen eines Produkts über seinen gesamten Lebenszyklus.⁶¹ Das LCA-Konzept findet sich auch in weiteren Richtlinien, z.B. zu Abfällen,⁶² zum Energie-Label⁶³ sowie zu Biokraftstoffen⁶⁴ und in verschiedenen weiteren Vorhaben, z.B. dem Aktionsplan für die Kreislaufwirtschaft⁶⁵ sowie der EU-Biodiversitätsstrategie,⁶⁶ wieder.

Auf globaler Ebene befasst sich die Initiative *Greenhouse Gas Protocol* damit, in Zusammenarbeit mit Regierungen, Verbänden, Unternehmen und NGOs weltweit standardisierte Bilanzierungs- und Reportingmethoden für Treibhausgasemissionen zu entwickeln. Der dazu entwickelte Standard teilt die Treibhausgasemissionen einer Organisation in drei Bereiche (Scope 1-3) ein.⁶⁷ Scope 1 und Scope 2 Emissionen umfassen die direkten Emissionen die zu dem Unternehmen gehörenden oder von ihm kontrollierten Quellen stammen (Scope 1) sowie die indirekten Emissionen die mit dem Kauf von Strom und anderen Energieformen verbunden sind (Scope 2).⁶⁸ Demgegenüber enthalten Scope 3 Emissionen alle indirekten Emissionen, die in der gesamten Wertschöpfungskette des berichtenden Unternehmens entstehen, einschließlich der vor- und nachgelagerten Emissionen.⁶⁹ Der Berechnungsansatz zur Bestimmung der Scope 3 Emissionen folgt damit einem Lebenszyklusansatz. Diese Standards finden in der Praxis bereits Anwendung. So müssen Unternehmen, die sich im Rahmen der Science Based Targets Initiative (SBTi) ein bestimmtes (freiwilliges) Emissionsreduktionsziel auferlegt haben, auch ihre Scope 3 Emissionen zur Zielerfüllung berücksichtigen.⁷⁰

⁶⁰ Verordnung (EWG) Nr. 880 /92 des Rates, Art. 3 und Art. 5 (4), <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:31992R0880>.

⁶¹ Richtlinie 2005/32/EG Abs. 2., <https://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2005:191:0029:0058:DE:PDF>.

⁶² Richtlinie 2008/98/EG, <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:32008L0098>.

⁶³ Richtlinie 2010/30/EU, <https://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2010:153:0001:0012:DE:PDF>.

⁶⁴ Richtlinie (EU) 2015/1513, <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:32015L1513>.

⁶⁵ Vgl. Europäische Kommission (2020b).

⁶⁶ Vgl. Europäische Kommission (2020c).

⁶⁷ Siehe Greenhouse Gas Protocol Guidance <https://ghgprotocol.org/guidance-0>, abgerufen am 12.07.2023.

⁶⁸ Unter Scope 2-Emissionen werden nur die direkt am Punkt der Energieerzeugung entstehenden Emissionen erfasst. Vgl. Greenhouse Gas Protocol (2023a), S. 27.

⁶⁹ Vgl. Greenhouse Gas Protocol (2023b), S. 5.

⁷⁰ Vgl. SBTi (2023), S. 17.

6 Die Verzerrung der Technologiewahl hat negative Folgen und läuft den Zielsetzungen des Klimaschutzes entgegen

Die Verwendung eines TTW-Ansatzes in der Regulierung von Sektoren birgt die Gefahr von Verzerrungen und Fehlanreizen (Abschnitt 6.1). Dies kann den Zielsetzungen des Klimaschutzes entgegenstehen (Abschnitt 6.2).

6.1 Bei Verwendung eines TTW-Ansatzes ist nicht sichergestellt, dass sachgerechte Anreize zur Minderung von CO₂ gesetzt werden

Um einen umfassenden Technologievergleich zu gewährleisten, sollten alle Emissionen, die ein Fahrzeug in anderen Sektoren oder anderen Ländern verursacht, dem Fahrzeug entsprechend zugerechnet werden; z.B. im Energiesektor bei der Erzeugung der Antriebsenergie oder im Industriesektor, ggf. in einem außereuropäischen Land, bei der Herstellung des Fahrzeugs oder Fahrzeugkomponenten, wie es insbesondere für Batterien der Fall ist (dazu auch im folgenden Abschnitt). Eine ausschließliche Betrachtung des europäischen Verkehrssektors ist für die Erreichung der Gesamtemissionsziele wenig aussagekräftig – insbesondere im Zusammenhang mit der Diskussion um die Sektorkopplung.

Eine isolierte Fokussierung wie „Tank-to-Wheel“ auf eine einzelne Lebenszyklusstufe kann wirksamen Klimaschutz verzerren, da hierdurch die Verwendung von Technologien angereizt werden, die speziell die Emissionen einer einzelnen Stufe (etwa Tank-to-Wheel) reduzieren, ohne die Emissionen der anderen Stufen zu berücksichtigen. Dies kann zu einer Reihe von Nachteilen führen:

- **Ineffizienz:** Separate CO₂-Reduktionsanstrengungen innerhalb einzelner Lebenszyklusstufen können zu Ineffizienzen gegenüber einer gesamtheitlichen CO₂-Reduktionsstrategie führen, da stufenübergreifende Synergien schwieriger zu erkennen und zu nutzen sind.
- **Ineffektivität:** Ggf. werden in Summe keine Emissionen vermieden, sondern nur von einer Lebenszyklusstufe in eine andere verlagert und ggf. sogar erhöhen. Es werden bei Verwendung eines TTW-Ansatzes ggf. von den Akteuren Technologien gewählt, die zwar CO₂-Emissionen auf der TTW Stufe mindern, nicht jedoch insgesamt zu einer Minderung der Klimawirksamkeit beitragen. In dem Fall würde kein Beitrag zu den Klimaschutzziele geleistet. In welchem Ausmaß dies eintritt, hängt von einer Vielzahl von Faktoren ab, insbesondere auch dem Zusammenspiel der Anreiz- und Fördersysteme für die Technologien zur Senkung der CO₂-Emissionen über alle Wertschöpfungs- und Lebenszyklusstufen hinweg.

6.2 Bei Verwendung eines LCA-Ansatzes werden Emissionen ggf. in das Ausland verlagert

Für den Treibhauseffekt unerheblich ist, wo die Emissionen weltweit entstehen. Deshalb sollten nicht nur Treibhausgasemissionen betrachtet werden, die bei der Produktion eines Fahrzeugs in Deutschland oder in der EU entstehen, sondern auch die, die in Zulieferländern wie China anfallen. Letztlich ist es für die Klimaschutzziele nicht entscheidend, ob die CO₂-Emissionen alleine bei der Fahrzeugnutzung (TTW) gering oder null sind

CO₂-Emissionen, die außerhalb der EU anfallen (v.a. für die Batteriezellenfertigung), werden bei einem TTW-Ansatz systematisch nicht erfasst und bewertet. Werden CO₂-Emissionen also ins außereuropäische Ausland verlagert, werden zwar einerseits die klimapolitischen Ziele innerhalb der EU einfacher erreichbar, allerdings wird der Klimaschutz global geschwächt.

Die EU hat erkannt, dass Regulierung in der Europäischen Union das Risiko birgt, dass CO₂-Emissionen in andere Länder verlagert werden und dass steigende, durch Importe verursachte CO₂-Emissionen die Bemühungen der Union zur Reduzierung ihres globalen Fußabdrucks in Bezug auf CO₂-Emissionen untergraben, auch wenn die Union ihre internen Treibhausgasemissionen erheblich reduziert.⁷¹

Das (bisher nur) für bestimmte Waren geschaffene CO₂-Grenzausgleichssystem (Carbon Border Adjustment Mechanism, CBAM) ist eine Klimaschutzmaßnahme, die die Verringerung der weltweiten Treibhausgasemissionen unterstützen und das Risiko einer Verlagerung von CO₂-Emissionen verhindern soll.⁷² Allerdings startet der CBAM im Oktober 2023 zunächst in einer Übergangsphase mit Berichtspflichten, also ohne finanzielle Folgewirkungen.⁷³ Die Übergangsphase soll sich bis Ende 2025 erstrecken, erst dann sollen Zahlungswirkungen greifen. Zudem soll der Mechanismus zunächst nur auf die folgenden Güter angewendet werden, die ein hohes Potenzial für Carbon Leakage bergen: Aluminium, Eisen, Stahl, Düngemittel, Strom, Wasserstoff und Zement. Der Mechanismus berücksichtigt hierbei direkte wie indirekte Emissionen der Herstellung der Produkte.

⁷¹ Verordnung (EU) 2023/956 zur Schaffung eines CO₂-Grenzausgleichssystems, Erwägungsgründe 8 und 9.

⁷² Verordnung (EU) 2023/956 zur Schaffung eines CO₂-Grenzausgleichssystems, Erwägungsgrund 15, vgl. auch Erwägungsgrund 81 und Art. 1 Absatz 1.

⁷³ Vgl. Europäische Kommission (2023).

7 Fazit

In der Gesamtschau entspricht demnach die Verwendung eines LCA-Ansatzes zur Erfassung von CO₂-Emissionen von Produkten und Technologien dem Stand der Wissenschaft und ist im Gegensatz zu einem TTW-Ansatz als sachgerecht zu beurteilen.

Eine nationale bzw. auf die EU beschränkte, sektorspezifische Betrachtung wie die Flottenregulierung gibt nur wenig Aufschluss über die tatsächlichen Auswirkungen einer Technologie auf das Klima. Dies erfordert eine Systemanalyse, die von einer sektorübergreifenden, globalen und zeitlich unbegrenzten Systemgrenze ausgeht. Dieser Systemansatz der Lebenszyklusanalyse bilanziert die CO₂-Emissionen über den gesamten Lebenszyklus der Antriebstechnologie und bildet damit die ganzheitlichen CO₂-Emissionen ab.

8 Literaturverzeichnis

- BMUV (2023), faq – CO₂-Flottengrenzwerte, Stand: 8. März 2023, [https://www.bmuv.de/fileadmin/Daten_BMU/Download_PDF/Verkehr/CO₂_flottengrenzwerte_faq_230308_bf.pdf](https://www.bmuv.de/fileadmin/Daten_BMU/Download_PDF/Verkehr/CO2_flottengrenzwerte_faq_230308_bf.pdf)
- Bunse et al. (2022), Greenhouse gas abatement costs for passenger cars, Bunse, Mark et al., studio Gear Up B.V., Studie im Auftrag von ePURE, Mai 2022, https://www.studiogearup.com/wp-content/uploads/2022/05/2022_sGU-for-ePURE_Greenhouse-gas-abatement-costs-for-passenger-cars-DEF.pdf
- Dai et al. (2019), Life Cycle Analysis of Lithium-Ion Batteries for Automotive Applications, Dai, Qiang et al., Batteries Nr. 5, Vol 48, 2019, <https://www.mdpi.com/2313-0105/5/2/48>
- Degen und Schütte (2022), Life cycle assessment of the energy consumption and GHG emissions of state-of-the-art automotive battery cell production, Degen, Florian und Schütte, Marius, Journal of Cleaner Production, Vol. 330, 1. Januar 2022.
- EEA (2023), Greenhouse gas emission intensity of electricity generation, European Environment Agency (EEA), abgerufen am 12. Juli 2023, [https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/daviz/CO₂-emission-intensity-13#tab-googlechartid_chart_11](https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/daviz/CO2-emission-intensity-13#tab-googlechartid_chart_11)
- Euractiv (2022), Sales of high-blend ethanol surge in France amid rising fuel prices, Goulding Carroll, Sean, 20. Juni 2022, <https://www.euractiv.com/section/biofuels/news/sales-of-high-blend-ethanol-surge-in-france-amid-rising-fuel-prices/>, abgerufen am 12. Juli 2023.
- Euractiv (2023), Swedish climate minister dismisses far-right's biofuel threats, Szumski, Charles, 12. April 2023, <https://www.euractiv.com/section/politics/news/swedish-climate-minister-dismisses-far-rights-biofuel-threats/>, abgerufen am 13. Juli 2023.
- Europäische Kommission (2020a), Determining the environmental impacts of conventional and alternatively fuelled vehicles through LCA, Final Report for the European Commission, DG Climate Action, Ricardo Energy & Environment, 13. Juli 2020, https://climate.ec.europa.eu/system/files/2020-09/2020_study_main_report_en.pdf
- Europäische Kommission (2020b), MITTEILUNG DER KOMMISSION AN DAS EUROPÄISCHE PARLAMENT, DEN RAT, DEN EUROPÄISCHEN WIRTSCHAFTS- UND SOZIALAUSSCHUSS UND DEN AUSSCHUSS DER REGIONEN - Ein neuer Aktionsplan für die Kreislaufwirtschaft - Für ein saubereres und wettbewerbsfähigeres Europa, Brüssel, 11. März 2020, <https://eur->

[lex.europa.eu/resource.html?uri=cellar:9903b325-6388-11ea-b735-01aa75ed71a1.0016.02/DOC_1&format=PDF](https://eur-lex.europa.eu/resource.html?uri=cellar:9903b325-6388-11ea-b735-01aa75ed71a1.0016.02/DOC_1&format=PDF)

- Europäische Kommission (2020c), MITTEILUNG DER KOMMISSION AN DAS EUROPÄISCHE PARLAMENT, DEN RAT, DEN EUROPÄISCHEN WIRTSCHAFTS- UND SOZIALAUSSCHUSS UND DEN AUSSCHUSS DER REGIONEN - EU-Biodiversitätsstrategie für 2030 - Mehr Raum für die Natur in unserem Leben, Brüssel, 20. Mai 2020, https://eur-lex.europa.eu/resource.html?uri=cellar:a3c806a6-9ab3-11ea-9d2d-01aa75ed71a1.0002.02/DOC_1&format=PDF
- Europäische Kommission (2021a), Europäischer Grüner Deal: Kommission schlägt Neuausrichtung von Wirtschaft und Gesellschaft in der EU vor, um Klimaziele zu erreichen, Pressemitteilung, Brüssel, 14. Juli 2021, https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/de/IP_21_3541
- Europäische Kommission (2021b), COMMISSION STAFF WORKING DOCUMENT - IMPACT ASSESSMENT, Part 2, Accompanying the document - Proposal for a REGULATION OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL amending Regulation (EU) 2019/631 as regards strengthening the CO₂ emission performance standards for new passenger cars and new light commercial vehicles in line with the Union's increased climate ambition, Brüssel, 14. Juli 2021, <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A52021SC0613>.
- Europäische Kommission (2023), Anpassung des CO₂-Grenzwertes (CBAM): EU-Kommission konsultiert zu den Berichtspflichten, Pressemitteilung, Vertretung in Deutschland, 13. Juni 2023, [https://germany.representation.ec.europa.eu/news/anpassung-des-CO₂-grenzwertes-cbam-eu-kommission-konsultiert-zu-den-berichtspflichten-2023-06-13_de](https://germany.representation.ec.europa.eu/news/anpassung-des-CO2-grenzwertes-cbam-eu-kommission-konsultiert-zu-den-berichtspflichten-2023-06-13_de)
- Fraunhofer ISI (2022), Langfristszenarien für die Transformation des Energiesystems in Deutschland, Treibhausgasneutrale Szenarien T45, Dr. Frank Sensfuß, 15. November 2022, https://www.langfristszenarien.de/enertile-explorer-wAssets/docs/LFS3_T45_Szenarien_15_11_2022_final.pdf und Szenario Explorer <https://langfristszenarien.de/enertile-explorer-de/szenario-explorer/>, abgerufen am 12. Juli 2023.
- Frontier Economics (2019), Die CO₂-Gesamtbilanz für Antriebstechnologien im Individualverkehr heute und in Zukunft – Lebenszyklusanalysen als Basis für zielführende Klimapolitik und Regularien, Studie im Auftrag von UNITI Bundesverband mittelständischer Mineralölunternehmen e. V., November 2019, <https://www.efuel-alliance.eu/fileadmin/Downloads/RPT-Frontier-Uniti-LCA-26-11-2019.pdf>
- Frontier Economics (2020), Cradle-to-Grave-Lebenszyklusanalyse im Mobilitätssektor - Metastudie zur CO₂-Bilanz alternativer Fahrzeugantriebe, Frontier Economics im

NOTWENDIGKEIT EINER LEBENSZYKLUSANALYSE IN DER FLOTTENREGULIERUNG

Auftrag der Forschungsvereinigung Verbrennungskraftmaschinen e.V. (FVV), Juni 2020

- Greenhouse Gas Protocol (2023a), GHG Protocol Scope 2 Guidance - An amendment to the GHG Protocol Corporate Standard, World Resources Institute, Sotos, Mary, <https://ghgprotocol.org/sites/default/files/2023-03/Scope%20%20Guidance.pdf>
- Greenhouse Gas Protocol (2023b), Corporate Value Chain (Scope 3) Accounting and Reporting Standard - Supplement to the GHG Protocol Corporate Accounting and Reporting Standard, World Resources Institute, Bhatia, Pankaj et al., https://ghgprotocol.org/sites/default/files/standards/Corporate-Value-Chain-Accounting-Reporting-Standard_041613_2.pdf
- Joanneum Research Life (2019), Geschätzte Treibhausgasemissionen und Primärenergieverbrauch in der Lebenszyklusanalyse von PKW-basierten Verkehrssystemen, Jungmeier, Gerfried et al., Studie für den Österreichischen Automobil- und Touringclub (ÖAMTC), FIA und ADAC, September 2019.
- Lai et al. (2023), Investigating greenhouse gas emissions and environmental impacts from the production of lithium-ion batteries in China, Lai, Xin et al., Journal of Cleaner Production, Vol. 372, 20. Oktober 2022.
- McKinsey & Company (2023), The race to decarbonize electric-vehicle batteries, Linder, Martin et al., 23. Februar 2023, <https://www.mckinsey.com/industries/automotive-and-assembly/our-insights/the-race-to-decarbonize-electric-vehicle-batteries#/>.
- Popien et al. (2023a), Comparison of lithium-ion battery supply chains – a life cycle sustainability assessment, 30th CIRP Life Cycle Engineering Conference, Popien, Jan-Linus et al., Procedia CIRP 116 (2023), S. 131–136.
- Popien et al. (2023b), Comparative sustainability assessment of lithium-ion, lithium-sulfur, and all-solid-state traction batteries, Popien, Jan-Linus et al., The International Journal of Life Cycle Assessment (2023) 28, S. 462-477.
- Prussi et al. (2020), JEC Well-To-Wheels report v5 - Well-to-Wheels analysis of future automotive fuels and powertrains in the European context, Prussi, M., JRC (the Joint Research Centre of the European Commission), EUCAR and Concawe, Publication Office of the European Union, <https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/handle/JRC121213#:~:text=As%20an%20update%20of%20the,Europe%20in%202025%20and%20beyond>
- Ricardo (2023), Research for TRAN Committee - Environmental challenges through the life cycle of battery electric vehicles, Hill, Nikolas, Raugei, Marco et al., Studie für das Committee on Transport and Tourism des Europäischen Parlament, März 2023,

[https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/STUD/2023/733112/IPOL_STU\(2023\)733112_EN.pdf](https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/STUD/2023/733112/IPOL_STU(2023)733112_EN.pdf)

- 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 schwedischen Transportverwaltung (Trafikverket), Mai 2017
- Sala et. al (2021), The evolution of life cycle assessment in European policies over three decades, The International Journal of Life Cycle Assessment (2021), Vol. 26, S. 2295–2314, <https://doi.org/10.1007/s11367-021-01893-2>.
- SBTi (2023), SBTi CORPORATE MANUAL, TVT-INF-002, Version 2.1, April 2023, <https://sciencebasedtargets.org/resources/files/SBTi-Corporate-Manual.pdf>
- Umweltbundesamt (2023), CO₂-Emissionen pro Kilowattstunde Strom stiegen in 2022, abgerufen am 12. Juli 2023, <https://www.umweltbundesamt.de/themen/CO2-emissionen-pro-kilowattstunde-strom-stiegen-in#:~:text=Die%20Erzeugung%20einer%20Kilowattstunde%20Strom,bei%20369%20Gramm%20pro%20Kilowattstunde.>
- VDI (2020), Ökobilanz von PKWs mit verschiedenen Antriebssystemen, Koch, Thomas et al., Karlsruher Institut für Technologie für den VDI Verein Deutscher Ingenieure e.V., Oktober 2020, https://www.vdi.de/fileadmin/pages/vdi_de/redakteure/vor_ort/bv/braunschweiger-bv/news/News_BV/VDI-Studie_Oekobilanz-PKW_Internet.pdf

Annex A - Annex

A.1 Übersicht der Tankstellen Klimadiesel25 und Klimadiesel90

Table 2 Übersicht der Tankstellen, die Klimadiesel25 und Klimadiesel90 anbieten

KD25	KD90	Tankstelle	Adresse	verfügbar
	✓	Tramin Tankcenter Hafen	Rhein- Ecke Elbestraße, 45478 Mülheim	Ende 2023
	✓	RHV Tankstelle Bad Hersfeld	Konrad-Zuse-Straße 8, 36251 Bad Hersfeld	Sommer 2023
	✓	RHV Tankstelle Frankfurt-Kalbach	Josef Eicher Str. 8, 60437 Frankfurt	Sommer 2023
	✓	Tramin Tankcenter Osterfeld	Bottroper Straße 228, 46117 Oberhausen	ab Juli 2023
	✓	Tramin Tankcenter Saarn	Kölner Straße 89, 45481 Mülheim	ab Juli 2023
✓		team energie Tankstelle	Berliner Chaussee 96, 39114 Magdeburg	ab 7. Juli 2023
✓		team energie Tankstelle	Marie-Curie-Straße 1, 24837 Schleswig	ab Juli 2023
	✓	RHV Tankstelle Eichenzell-Welkers	Am Langen Acker 17, 36124 Eichenzell	ab Juni 2023
	✓	RHV Tankstelle Baunatal	Salzgitterstraße 28, 34225 Baunatal	ab Juni 2023
✓		TAS Tankstelle Höxter	Brenkhäuser Str. 44, 37671 Höxter	ab 1. Juni 2023
✓		TAS Tankstelle Wesertal	Mühlenplatz 4, 34399 Wesertal	ab 1. Juni 2023
✓		TAS Tankstelle SZ- Salder	Museumstraße 50, 38229 Salzgitter-Salder	ab 1. Juni 2023
✓		team energie Tankstelle	Altländer Straße 29, 21680 Stade	ab 1. Juni 2023

NOTWENDIGKEIT EINER LEBENSZYKLUSANALYSE IN DER FLOTTENREGULIERUNG

KD25	KD90	Tankstelle	Adresse	verfügbar
✓		team energie Tankstelle	Eckernförder Straße 207, 24119 Kiel-Kronshagen	ab 31. Mai 2023
✓		team energie Tankstelle	Marie-Curie-Ring 45, 24941 Flensburg	ab 24. Mai 2023
	✓	BFT Willer	Gutenbergstraße 80-86, 24118 Kiel	ab 10. Mai 2023
✓		CLASSIC Tankstelle	Gifflitzer Straße 12, 34537 Bad Wildungen	ab 10. Mai 2023
✓		Joiss Tankstelle	Salzuflener Straße 68, 32602 Vlotho-Valdorf	ab 26. April 2023
✓		Joiss Tankstelle	Berenbosteler Straße 92, 30823 Garbsen	ab 26. April 2023
✓		FELTA Tankstelle	Celler Str. 25, 29525 Uelzen	ab 26. April 2023
✓		CLASSIC Tankstelle	Auricher Straße 68, 26556 Westerholt	ab 19. April 2023
✓		CLASSIC Tankstelle	Kirchweyher Straße 4, 28844 Kirchweyhe	ab 18. April 2023
✓		CLASSIC Tankstelle	Angelser Str. 2, 28844 Weyhe (Leeste)	ab 18. April 2023
	✓	Tramin Tankcenter Heisingen	Heisinger Straße 487, 45269 Essen	ab 1. April 2023
✓		FELTA Tankstelle	Mühlenstraße 30, 49401 Damme	ab April 2023
✓		CLASSIC Tankstelle	Oststraße 28, 33129 Delbrück	ab 30. März 2023
✓		WEVAG Tankstelle	Dingdener Straße 183 – 187, 46395 Bocholt	ab 30. März 2023
✓		Brämwig Tankstelle	Daimlerstraße 2, 49393 Lohne (Oldenburg)	ab 24. März 2023
✓		CLASSIC Tankstelle	Uerdinger Straße 108a, 47441 Moers	ab 27. März 2023
✓		Joiss Tankstelle	Burgstraße 36, 27243 Harpstedt	ab 3. März 2023

KD25	KD90	Tankstelle	Adresse	verfügbar
✓		Joiss Tankstelle	Nienburger Straße 10, 27232 Sulingen	ab 3. März 2023
✓		FELTA Tankstelle	Rathausstraße 5, 26826 Weener	ab 16. Februar 2023
✓		FELTA Tankstelle	Steinhauser Straße 14, 26345 Bockhorn	ab 13. Februar 2023
✓		FELTA Tankstelle	Münsterstraße 45, 49186 Bad Iburg	ab 10. Februar 2023
✓		FELTA Tankstelle	Falkenrotter Str. 163, 49377 Vechta	ab 8. Februar 2023
✓		FELTA Tankstelle	Visbeker Damm 1, 49429 Visbek	ab 7. Februar 2023
✓	✓	CLASSIC Tankstelle	Auf dem Kuhkamp 21, 27318 Hoya	ab 3. Februar 2023

Source: <https://klima-kraftstoffe.de/tankstellen>

Note: KD90 zum Zeitpunkt der Erstellung dieser Studie noch nicht frei verkäuflich.

A.2 Annahmen für die punktuellen Modellanpassungen

Die Aktualisierung des Modells zur Berechnung der Lebenszyklusanalysen erfolgte punktuell. Angepasst wurden die Annahmen für den Strommix der EU und Deutschlands, sowie die zugrunde gelegten CO₂-Emissionen der Batterieherstellung.

Annahmen für die CO₂-Intensitäten der Stromerzeugung:

- (a) CO₂-Intensität im Strommix EU – Der aktuelle Wert für die CO₂-Intensität des europäischen Strommix lag 2021 bei 238 gCO₂/kWh (vgl. EEA (2023)). Die Studie von 2019 sah für 2021 einen Wert von 281 gCO₂/kWh voraus, der sich aus den Prognosen des World Energy Outlook (2018) der IEA für die Stromerzeugung errechnen ließ. Den negativen Trend der CO₂-Intensität haben wir für die Aktualisierung beibehalten. Das führt dazu, dass beispielweise nur noch 141 gCO₂/kWh im europäischen Strommix des Jahres 2030 anfallen (im Vergleich zu 172 gCO₂/kWh in unserer Studie von 2019). Um eine 55%ige Reduktion der Treibhausgasemissionen in der zu EU erreichen, wie es die Fit-for-55 Initiative der EU vorsieht, muss die CO₂-Intensität im europäischen Strommix bis 2030 auf ca. 118 gCO₂/kWh absinken laut EEA (2023).
- (b) CO₂-Intensität im Strommix Deutschland

NOTWENDIGKEIT EINER LEBENSZYKLUSANALYSE IN DER FLOTTENREGULIERUNG

- (i) Strommix (A) – Hierfür nehmen wir für das Jahr 2022 den aktuellen Wert für die CO₂-Intensität im Strommix in Höhe von 434 gCO₂/kWh an (vgl. Umweltbundesamt (2023)). Wir berücksichtigen die Emissionsminderungsziele der Bundesregierung für den Stromsektor bis zum Jahr 2035 und legen für 2035 eine nahezu 100%ige Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien zugrunde. Damit betrüge die CO₂-Intensität des Strommix im Jahr 2030 nur noch 64 gCO₂/kWh und im Jahr 2035 27 gCO₂/kWh. Selbst wenn der Strom vollständig aus erneuerbaren Energien generiert wird, beträgt die CO₂-Intensität nicht null, da durch den Aufbau und Betrieb der erneuerbaren Anlagen ein „CO₂-Rucksack“ weiterhin dem Strom zugerechnet wird.
- (ii) Strommix (B) – (Ansatz analog zu (a)) Der aktuelle Wert für die CO₂-Intensität des deutschen Strommix lag 2022 bei 434 gCO₂/kWh (vgl. Umweltbundesamt (2023)). Die Studie von 2019 nahm für 2022 einen Wert von 443 gCO₂/kWh, der sich aus den Prognosen des BMWI für die Stromerzeugung errechnen ließ. Die negativen Wachstumsraten haben wir auch hier aus der Studie 2019 übernommen. Das führt dazu, dass beispielsweise für 2030 nur noch 341 gCO₂/kWh im europäischen Strommix angenommen werden (im Vergleich zu 348 gCO₂/kWh in unserer Studie von 2019). Der Wert für 2022 lag allerdings aufgrund der europäischen Gaskrise höher als er erwartet wurde. Für das Jahr 2021 betrug die CO₂-Intensität noch 420 gCO₂/kWh.
- (iii) Strommix (C) – Hier gehen wir davon aus, dass das Fahrzeug mit 100% erneuerbaren Strom geladen wird, d.h. wir nehmen an, dass bereits ab 2022 der Strom nur eine CO₂ Intensität von 27 gCO₂/kWh hat. Dieses Beispiel ist nur dann für ein Fahrzeug von 2022 realistisch, wenn das Fahrzeug beispielsweise ausschließlich mit privat erzeugtem Solarstrom ohne Anschluss ans Stromnetz (z.B. durch eine Photovoltaik-Anlage auf dem eigenen Hausdach oder der Arbeitsstätte) geladen wird.

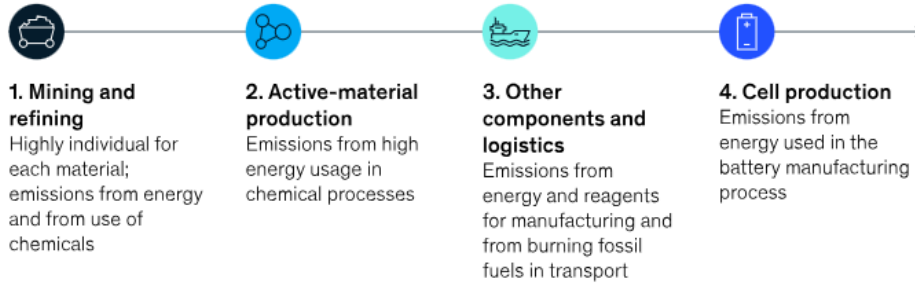
Die Emissionen aus der Batterieherstellung wurden in der Studie (2019) mit Hilfe der Strom-CO₂-Intensität der Herstellungsländer und den Daten zur Batterieherstellung aus Romare und Dahllöf (2017) berechnet. Die generelle Verfügbarkeit von Daten zur Batterieherstellung und den dazugehörigen CO₂-Emissionen war zum Zeitpunkt der Veröffentlichung der Frontier Economics (2019) Studie begrenzt. Die Situation hat sich seitdem erheblich verbessert, weshalb wir uns für die Berechnungen der CO₂-Emissionen für die Batterieherstellung nun auf aktuellere Daten stützen. Es wird von den Studien generell festgestellt, dass neben dem Herstellungsland (siehe beispielsweise Abbildung 9) insbesondere die Art und Zusammensetzung der chemischen Komponenten der Batterie (siehe beispielsweise Abbildung 10) eine wesentliche Rolle spielt. Um diese Aspekte in unserer Analyse zu berücksichtigen, haben wir für die Berechnungen verschiedene CO₂-Emissionen bei der Batterieherstellung unterstellt. Folgende Werte haben wir hierzu zugrunde gelegt:

NOTWENDIGKEIT EINER LEBENSZYKLUSANALYSE IN DER FLOTTENREGULIERUNG

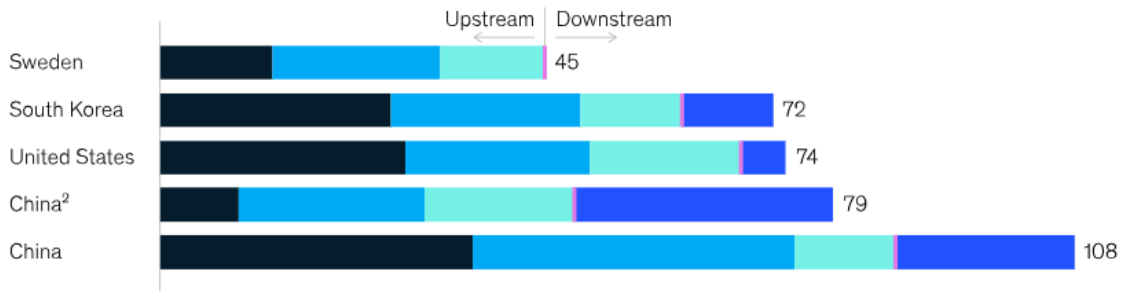
- (a) Minimum: 45 kgCO₂eq/kWh Batteriekapazität – Dies entspricht dem geringsten Wert unserer Recherche und den CO₂-Emissionen einer z.B. in Schweden hergestellten Batterie (vgl. McKinsey & Company (2023))
- (b) 75 kgCO₂eq/kWh Batteriekapazität - Dies entspricht den CO₂-Emissionen einer in den USA hergestellten Batterie (vgl. McKinsey & Company (2023)). Dai et al. (2019) konnten die realen Daten eines chinesischen Kathoden-Herstellers auswerten und kommen für eine NMC11-Batterie auf einen Emissionswert von 73 kgCO₂eq/kWh.
- (c) 110 kgCO₂eq/kWh Batteriekapazität – Dies entspricht gemäß McKinsey & Company (2023) den CO₂-Emissionen einer in China hergestellten Batterie, die Nickel in der Zusammensetzung verwendet. Popien et al (2023b) weist ebenfalls einige Lithium-Ionen-Batterien in diesem Bereich aus (z.B. NCA, NMC622). Die Autoren nehmen hierbei an, dass die Material- und Komponentenfertigung in China stattfindet, während die Batteriezelle in Deutschland gefertigt wird.
- (d) Maximum: 140 kgCO₂eq/kWh Batteriekapazität – Dies entspricht gemäß einer weiteren aktuellen Studie der derzeitigen CO₂-Intensität der Herstellung von NCA- und NCM-Lithium-Ionen-Batterien in China und wird von uns als Maximum der Emissionsintensität betrachtet (vgl. Lai et al. (2023)).

Abbildung 9 Vergleich der CO₂-Emissionen bei der Batterieherstellung zwischen verschiedenen Ländern

Emissions in the battery value chain are primarily driven by production location and sources of raw materials and energy.



Emission intensities, kg CO₂e/kWh¹



¹Bottom-up modeling of cell-level emission intensities in individual "gigafactories." Emission intensities were estimated based on existing supply agreements with providers of raw materials, active materials, and energy. Market average has been taken where no information on the source of raw materials or energy was available.

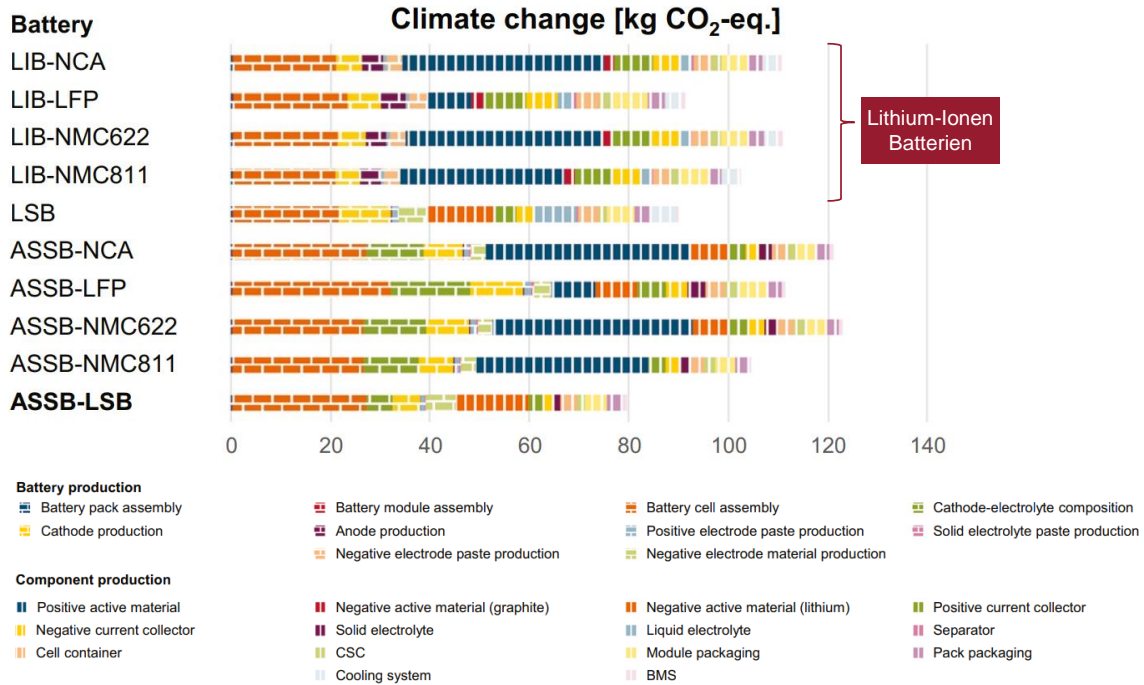
²Based on a nickel-free battery; all other examples are based on nickel-rich batteries.

Source: Greenhouse gases, Regulated Emissions, and Energy use in Technologies (GREET); MineSpans by McKinsey; McKinsey Battery Insights

McKinsey & Company

Quelle: McKinsey & Company (2023)

Abbildung 10 Vergleich der CO₂-Emissionen bei der Batterieherstellung verschiedener Batterien in China



Quelle: Popien et al. (2023)

Hinweis: [Insert Notes]



Frontier Economics Ltd is a member of the Frontier Economics network, which consists of two separate companies based in Europe (Frontier Economics Ltd) and Australia (Frontier Economics Pty Ltd). Both companies are independently owned, and legal commitments entered into by one company do not impose any obligations on the other company in the network. All views expressed in this document are the views of Frontier Economics Ltd.