

# DIE CO<sub>2</sub>-GESAMTBILANZ FÜR ANTRIEBSTECHNOLOGIEN IM INDIVIDUALVERKEHR HEUTE UND IN ZUKUNFT

## LEBENSZYKLUSANALYSEN ALS BASIS FÜR ZIELFÜHRENDE KLIMAPOLITIK UND REGULARIEN

November 2019



## Studie im Auftrag von:




UNITI Bundesverband  
mittelständischer  
Mineralölunternehmen e. V.

UNITI Bundesverband mittelständischer Mineralölunternehmen e. V.

Jägerstraße 6

10117 Berlin

[www.uniti.de](http://www.uniti.de)

 030 755 414 300

### **Ansprechpartner**

Dirk Arne Kuhrt

 [kuhrt@uniti.de](mailto:kuhrt@uniti.de)

Elmar Kühn

 [kuehn@uniti.de](mailto:kuehn@uniti.de)

Adem Ates

 [ates@uniti.de](mailto:ates@uniti.de)

### **Jens Perner**

 +49 221 337 13 102

 [jens.perner@frontier-economics.com](mailto:jens.perner@frontier-economics.com)

### **Theresa Steinfort**

 +49 221 337 13 139

 [theresa.steinfort@frontier-economics.com](mailto:theresa.steinfort@frontier-economics.com)

---

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



# INHALT

---

|   |    |
|---|----|
| Zusammenfassung   | 6  |
| 1. Ziel und Hintergrund der Studie  | 12 |
| 2. Der öffentliche Blick auf Lösungen für CO <sub>2</sub> -Minderungen im Straßenverkehr ist noch beschränkt                | 15 |
| 2.1 Erreichen der Klimaschutzziele erfordert massive CO <sub>2</sub> -Emissionsminderungen auch im Straßenverkehr           | 15 |
| 2.2 Der aktuelle PKW-Bestand mit seinen heutigen Antriebstechnologien nutzt überwiegend Flüssigkraftstoffe                  | 17 |
| 2.3 CO <sub>2</sub> -Einsparungen im Verkehr sind auf vielfältige Weise erzielbar und sinnvoll                              | 18 |
| 2.4 Technologische Vielfalt trifft heute auf verengte politische Regularien   | 19 |
| 3. Der Wechsel von der Frosch- zur Vogelperspektive ist eingeleitet und schreitet voran                                     | 22 |
| 3.1 Eine ganzheitliche Lebenszyklusanalyse ist die Grundlage für robuste Strategien und tragfähige Konzepte                 | 22 |
| 3.2 Dieses Jahr hat sich der Fokus der öffentlichen Debatte bereits erweitert   | 25 |
| 3.3 Unsere Untersuchung soll zu weiterer Transparenz und Kenntniserweiterung beitragen                                      | 25 |
| 4. Aus der Vogelperspektive ergeben sich heute schon neue Erkenntnisse  | 28 |
| 4.1 Bei ganzheitlicher Betrachtung sind die CO <sub>2</sub> -Emissionen bei batterieelektrischen Fahrzeugen unerwartet hoch | 28 |
| 4.2 Die Vorteilhaftigkeit von BEV vs. ICEV variiert stark mit dem Einzelfall  | 30 |
| 4.3 Viele Einflussfaktoren bestimmen im Einzelfall die CO <sub>2</sub> -Gesamtbilanz der Antriebstechnologien               | 39 |
| 5. Zukünftig gibt es mit ICEV und BEV mindestens zwei Technologieoptionen für eine nachhaltige CO <sub>2</sub> -Minderung   | 43 |
| 5.1 Zukünftig sind bei ICEV CO <sub>2</sub> -Minderungen durch die Beimischung von E-Fuels möglich                          | 43 |
| 5.2 Durch Beimischung von E-Fuels bleibt die CO <sub>2</sub> -Gesamtbilanz von ICEV und BEV auch zukünftig auf Augenhöhe    | 46 |
| 5.3 Mit steigenden EE-Anteilen stehen mit ICEV und BEV zielführende Technologieoptionen zur Verfügung                       | 47 |
| 6. Klimapolitisch und regulatorisch ist eine Öffnung in Richtung Technologieoffenheit erforderlich                          | 50 |
| 6.1 E-Fuels sind neben Elektromobilität aus klimapolitischen Gründen gleichberechtigt voranzutreiben                        | 50 |
| 6.2 Für den gleichrangigen Technologiemarkt sprechen auch Kosten und Kundenbedürfnisse                                      | 51 |
| 6.3 Die nächsten Schritte sind entscheidend   | 59 |
| Anhang A      Abkürzungsverzeichnis   | 62 |
| Anhang B      Methodik der Analyse  | 63 |
| Übergeordnete Inputfaktoren   | 63 |
| Analysestufen im Detail   | 64 |

Anhang C      Limitationen unserer Analyse auf den verschiedenen Wertschöpfungsstufen 67

## ZUSAMMENFASSUNG

---

Im Kontext des Pariser Klimaschutzabkommens haben sich Deutschland und die Europäische Union ambitionierte Ziele bei der Minderung der Treibhausgas-Emissionen („THG-Emissionen“) bis 2050 gesetzt. Dieses Ziel erfordert ambitionierte CO<sub>2</sub>-Reduktionsstrategien in allen energieverbrauchenden Sektoren. Dies schließt den Straßenverkehrssektor mit ein, dessen THG-Emissionen in jüngerer Zeit die politische Aufmerksamkeit auf sich gezogen haben. So konnten die THG-Emissionen im Verkehrssektor seit 1990 trotz effizienterer Fahrzeuge wegen zunehmender Mobilitätsnachfrage nicht reduziert werden. Vor diesem Hintergrund ist eine intensive energiepolitische Debatte entbrannt, mit welchen Konzepten und Technologien im Straßenverkehr eine massive und nachhaltige Reduzierung der CO<sub>2</sub>-Emissionen erreicht werden kann.

Ziel dieser Studie ist die Untersuchung der Klimabilanz verschiedener Antriebsarten, hier mit Fokus auf batterieelektrische Fahrzeuge und Fahrzeuge mit Verbrennungsmotoren (mit heutigen Brennstoffen sowie mit Beimischung „grüner“ E-Fuels) über den gesamten Lebenszyklus der Fahrzeuge. Im Mittelpunkt steht die Gegenüberstellung der Optionen „erneuerbar hergestellter Ladestrom“ und „erneuerbar hergestellte Flüssigkraftstoffe“. Hierbei betrachten wir die heutige Situation wie auch zukünftige Szenarien, in denen die Bereitstellung der Antriebsenergien zunehmend grüner wird, und zwar sowohl stromseitig als auch auf Seiten der Flüssigkraftstoffe.

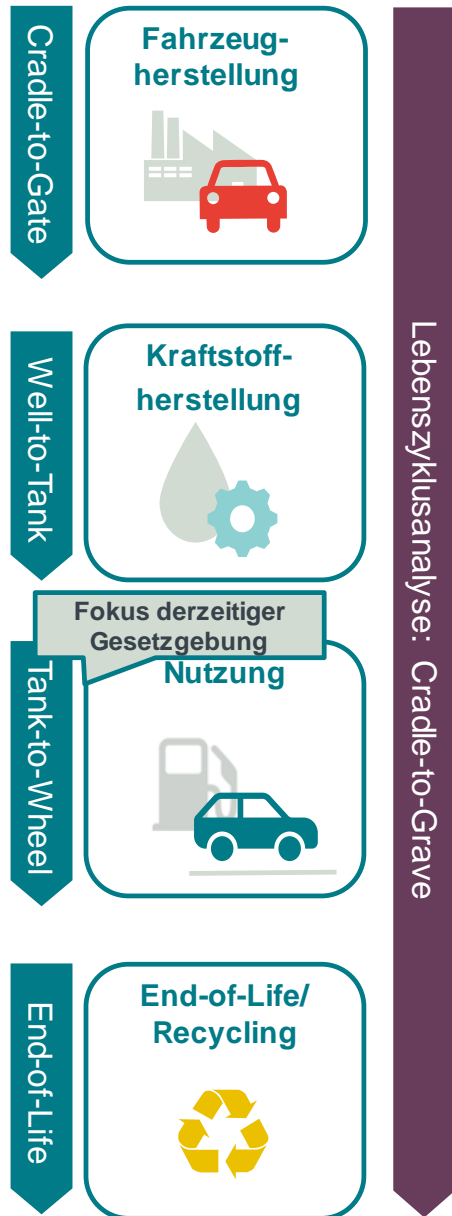
Die Studie sowie das zugehörige Berechnungstool (Excel-Modell) zeigen Wirkzusammenhänge und Ergebnisse, die zu mehr Transparenz und Vergleichbarkeit von technologischen Lösungsoptionen bezüglich der CO<sub>2</sub>-Emissionen über den Lebenszyklus beitragen sollen. Auf dieser Basis ist die Entwicklung fachlich fundierter und robuster Strategien besser möglich.

Die Ergebnisse können wie folgt zusammengefasst werden:

### CO<sub>2</sub>-Einsparungen im Verkehr sind auf vielfältige Weise erzielbar und sinnvoll

Ein Hebel ist die Umstellung der Fahrzeuge auf kraftstoffsparende Antriebe wie bei Batterieelektrischen Fahrzeugen (BEV, battery electric vehicle) oder hocheffizienten Verbrennungsmotoren (ICEV, internal combustion engine vehicle). Ein anderer Hebel ist die Umstellung von fossilen auf klimaneutrale Antriebsenergien wie grünen Ladestrom oder aus Erneuerbaren Energien hergestellte Flüssigkraftstoffe (E-Fuels).

Abbildung 1. Ganzheitliche LCA beachtet alle Lebenszyklusabschnitte



Quelle: Frontier Economics

### Diese technologische Vielfalt trifft jedoch derzeit auf eingeschränkte Sichtweise und politische Regularien

In Teilen der Politik, insbesondere für den Individualverkehr (PKW), werden BEV als technologische Lösung der Wahl zur Minderung von CO<sub>2</sub>-Emissionen gesehen, und in der allgemeinen aktuellen Debatte gelten batterieelektrische Fahrzeuge als CO<sub>2</sub>-emissionsfrei, da direkt am Fahrzeug während der Nutzung keine CO<sub>2</sub>-Emissionen erzeugt werden. Im Unterschied dazu fallen während der Nutzung bei einem Fahrzeug mit Verbrennungsmotor (ICEV, internal combustion engine vehicle) immer CO<sub>2</sub>-Emissionen an. Bei dieser direkt am Fahrzeug ansetzenden System- bzw. Bilanzierungsgrenze (Tank-to-Wheel) ist folglich der batterieelektrische Antrieb im Vergleich zum verbrennungsmotorischen Antrieb hinsichtlich der CO<sub>2</sub>-Bilanz stets klar im Vorteil. Dies hat zur Folge, dass verschiedene klimapolitische Weichenstellungen sowohl in Deutschland als auch auf Ebene der EU derzeit einseitig in Richtung batterieelektrischer Fahrzeuge ausgerichtet sind.

### Eine ganzheitliche Lebenszyklusanalyse ist die Grundlage für robuste Strategien und tragfähige Konzepte

Bei der oben genannten eingeschränkten Tank-to-Wheel Betrachtung wird nur ein einzelner Lebenszyklusabschnitt, die Nutzung der Fahrzeuge, beachtet. Um dagegen Technologieoptionen möglichst ganzheitlich hinsichtlich ihrer Klimaeffekte zu betrachten und zu bewerten, ist die Perspektive in Richtung einer ganzheitlichen Lebenszyklusanalyse (Cradle-to-Grave) zu erweitern (**Abbildung 1**). Hierbei werden neben der Nutzungsphase auch die Fahrzeugherstellung, die Herstellung der Antriebsenergie und die Entsorgung bzw. das Recycling des Fahrzeugs berücksichtigt. Auch werden nicht nur mit der Herstellung der Fahrzeuge verbundene Emissionen in Deutschland oder der EU, sondern auch in Zulieferländern wie China berücksichtigt. In unserer Studie berechnen wir Lebenszyklusanalysen exemplarisch für vier Fahrzeugtypen - drei PKW-Segmente (Kompakt-, Mittelklasse und SUV) und das Segment des leichten Nutzfahrzeugs (LNF).

### Aus der Vogelperspektive ergeben sich heute schon neue Erkenntnisse

Unter Berücksichtigung aller Lebenszyklusabschnitte ergeben sich unerwartet hohe CO<sub>2</sub>-Emissionen eines BEV. Für die CO<sub>2</sub>-Emissionen sind vor allem die sehr energieintensive Herstellung der Batterien, aber auch der vielerorts mit hohen Anteilen von fossilen Energien hergestellte Ladestrom verantwortlich. Hinzu kommt, dass CO<sub>2</sub>-Emissionen heute in erheblichem Maße aus Deutschland bzw. der EU in Drittstaaten „exportiert“ werden. So fallen heute bei der Herstellung von Batterien für Mittelklassefahrzeuge THG-Emissionen in einer Größenordnung von über 9t CO<sub>2</sub> an, wenn die Batterien z.B. in China hergestellt werden. Alleine mit diesen Emissionen –

**Abbildung 2. Viele Einflussfaktoren bestimmen die CO<sub>2</sub>-Gesamtbilanz im Einzelfall**

|                                       |
|---------------------------------------|
| Fahrzeugtyp                           |
| Jahr der Anschaffung                  |
| Nutzungsdauer in Jahren               |
| Jahresleistung, km                    |
| Batteriekapazität, kWh (Tankgröße)    |
| Kraftstoff                            |
| Entwicklung Strommix                  |
| Betriebsland                          |
| Strommix im Betriebsland              |
| Herstellungsland Batterie             |
| Strommix im Batterie Herstellungsland |

Quelle: Frontier Economics

Hinweis: Im Berechnungstool lassen sich die Wirkungszusammenhänge dieser und weiterer Einflussfaktoren analysieren.

das BEV hat hier noch keinen Kilometer zurückgelegt – können Mittelklassefahrzeuge mit Dieselantrieb mit den heutigen fossilen Kraftstoffen ca. 56.000 km fahren.

Beim Vergleich der Klimabilanz von BEV mit der von ICEV über den Lebenszyklus gesehen, stellt sich heraus, dass die Unterschiede in vielen Fällen relativ gering sind und es keine klar überlegene Technologie gibt. Vielmehr kommt es auf viele verschiedene Einflussfaktoren an, die im Einzelfall die CO<sub>2</sub>-Gesamtbilanz bestimmen. Zu den wichtigsten Einflussfaktoren, neben dem Strom- und Energiemix der Herstellungs- und Betriebsländer, gehören z.B. Fahrzeuggröße, Reichweite und Lebensfahrleistung des Fahrzeugs (**Abbildung 2**). Tendenziell zeigt sich in Bezug auf die Klimabilanz:

- **ICEV vorteilhaft** bei größeren Fahrzeugen und höheren Reichweiten: Das BEV startet durch die energieintensive Batterieherstellung mit einem größeren „CO<sub>2</sub>-Rucksack“ in den Betrieb als das ICEV. Mit Fahrzeuggröße und Reichweite nimmt auch die Größe der benötigten Batterie zu, mit entsprechenden Auswirkungen auf die CO<sub>2</sub>-Emissionen bei der Batterieherstellung.
- **BEV vorteilhaft** bei hohen Lebensfahrleistungen: Die Herstellung des Ladestroms für den Betrieb von BEV ist heute und in absehbarer Zukunft fast überall auf der Welt mit CO<sub>2</sub>-Emissionen verbunden. In vielen Fällen sind die Ladestrom-Emissionen in der Gesamtbilanz jedoch niedriger als die Emissionen, die durch die Verwendung fossiler Kraftstoffe im ICEV heute frei werden. Bei hoher Fahrleistung kann daher in diesen Fällen das BEV die höheren Herstellungsemissionen während der Nutzungsphase gegenüber dem ICEV kompensieren.

### Auch zukünftig sind sowohl ICEV als auch BEV Technologieoptionen für eine nachhaltige CO<sub>2</sub>-Minderung

Zukünftig haben sowohl BEV als auch ICEV das Potenzial zur Klimazielerreichung beizutragen. Hierbei spielt nicht nur die zunehmend auf Erneuerbaren Energien (EE) basierende Herstellung des Fahrzeugs, sondern auch die Bereitstellung von auf EE basierender Antriebsenergie eine entscheidende Rolle. Der CO<sub>2</sub>-Abdruck von...

- ...BEV kann zukünftig vermindert werden, wenn für die Batterieherstellung Strom aus Erneuerbaren Energien eingesetzt wird und die CO<sub>2</sub>-Intensität des Ladestroms abnimmt.
- ...ICEV kann deutlich reduziert werden, indem statt der derzeit fossilen Kraftstoffe (mit geringfügiger Biokraftbeimischung) zukünftig zunehmend Biokraftstoffe und v.a. synthetische Kraftstoffe, hergestellt aus Erneuerbaren Energien und damit klimabilanziell neutral, zum Einsatz kommen (sog. E-Fuels).

Die Beimischung von E-Fuels (für ICEV) und die zunehmende Herstellung des Produktions- und Ladestroms mit Erneuerbaren Energien (für BEV) sind damit beides Optionen zur CO<sub>2</sub>-Reduktion im



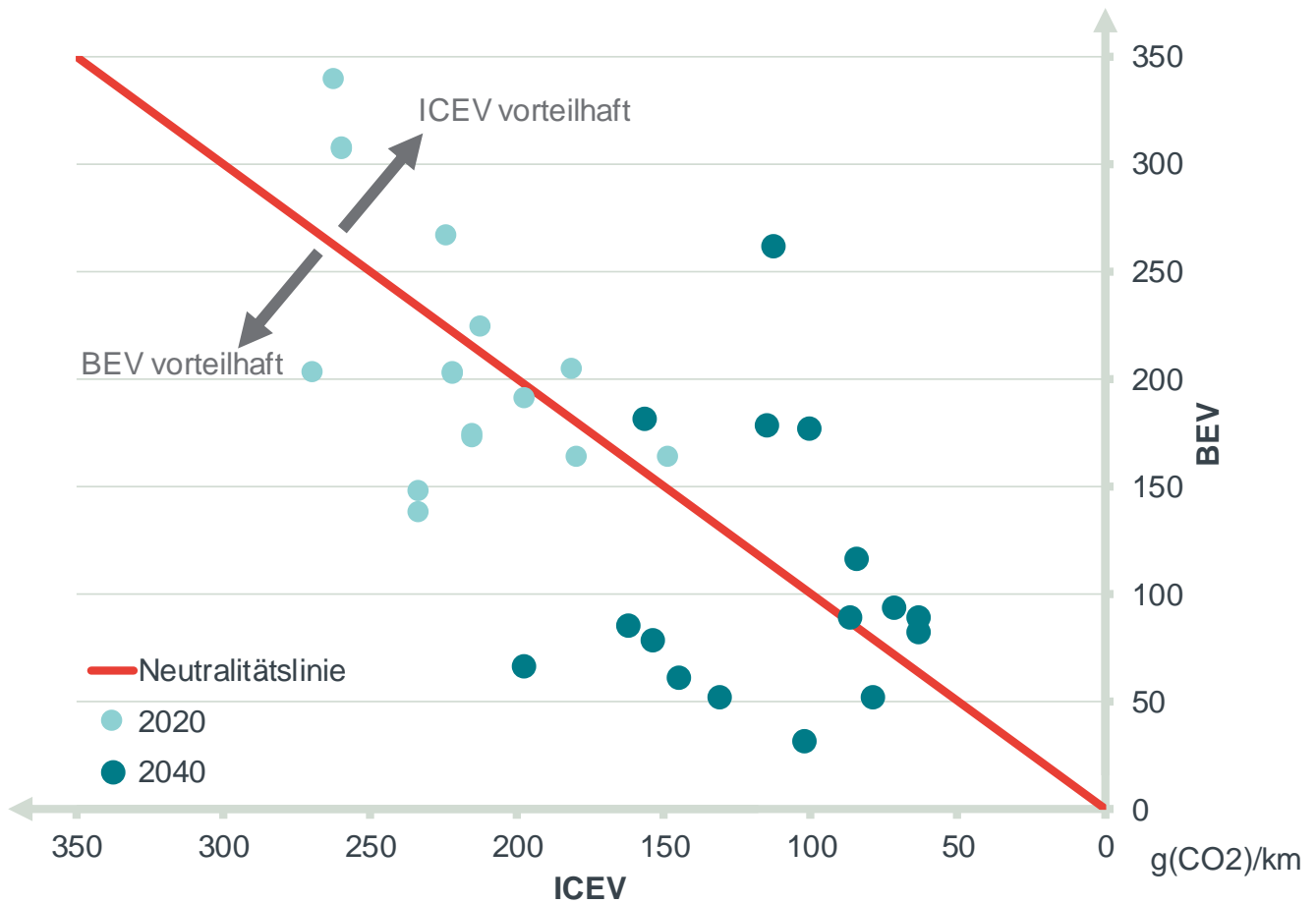
Verkehrssektor. Die Beibehaltung einer Vielfalt an Fahrzeugtypen und Antriebstechnologien bietet zudem das Potenzial, auch zukünftig den diversen Anforderungen an Mobilität gerecht zu werden, ohne Klimaschutzziele oder Anwendungsverlässlichkeit zu gefährden. Die jeweiligen Anwendungsschwerpunkte sind vielfältig:

- **BEV** sind perspektivisch vorteilhaft für leichtere PKW auf kürzeren Strecken in Regionen mit leicht ausbaubarer Ladeinfrastruktur (zum Beispiel auch für leichte Nutzfahrzeuge, die auf kurzen Distanzen genutzt werden).
- **ICEV**, mit zunehmendem Einsatz von E-Fuels, bieten sich bei PKW mit höherem Leistungsbedarf (etwa ab Mittelklasse) oder bei LNF mit höheren technischen Ansprüchen (Reichweite, Zuladung) an.

Dass auch langfristig der Einsatz einer Vielfalt von Technologieoptionen klimapolitisch sinnvoll sein kann, veranschaulicht **Abbildung 3**. Die Abbildung zeigt die durchschnittlichen CO<sub>2</sub>-Emissionen (g(CO<sub>2</sub>)/km) über den Lebenszyklus verschiedener Fahrzeugtypen mit unterschiedlichen Größen, Reichweiten, Lebensleistungen, Herstellungs- und Betriebsländern für die Jahre 2020 und 2040. Für den Langfristhorizont haben wir sowohl einen grüner werdenden Strommix für den Ladestrom von BEV (durchschnittliche CO<sub>2</sub>-Intensität zwischen 2040 und 2050 z.B. im Referenzfall in der EU mit 82%) als auch eine zunehmende Beimischung von E-Fuels angenommen (durchschnittlich 70% im Zeitraum 2040 - 2050). Punkte oberhalb der roten Linie deuten eine Vorteilhaftigkeit von ICEV in der Klimabilanz an, Punkte unterhalb der Linie eine Vorteilhaftigkeit von BEV.

Es zeigt sich also beim Vergleich der Klimabilanz von BEV mit ICEV auch hier, dass die Unterschiede in vielen Fällen relativ gering sind bzw. dass die CO<sub>2</sub>-Gesamtbilanz über den Einzelfall variiert.

Abbildung 3. Klimabilanzielle Vorteilhaftigkeit von ICEV und BEV variiert kurz- wie auch langfristig mit dem Einzelfall, sofern Strommix wie auch der Kraftstoffmix „grüner“ werden



Quelle: Frontier Economics

Hinweis: Die Abbildung stellt die Emissionen ansonsten baugleicher Fahrzeuge mit batterieelektrischem Antrieb und Verbrennungsantrieb für verschiedene Sensitivitäten der Analyse gegenüber. Variiert wurden hierbei der Fahrzeugtyp, die Nutzungsdauer und die Jahresleistung, das Betriebs- und Herstellungsland sowie die Annahmen bezüglich der zukünftigen Entwicklung des Strom- und Energiemixes.

Zudem bieten sich „grüne“ synthetische Kraftstoffe als mittelfristige Maßnahme an, da sie im Fahrzeugbestand ohne technische Anpassungen eingesetzt werden können – sowohl in Europa als auch in Teilen der Welt, in denen der flächendeckende Einsatz von BEV wegen fehlender Infrastruktur noch weit entfernt ist. Handling und Nutzung von E-Fuels sind relativ einfach, und ihr Einsatz wird bei einigen Anwendungen, die über die in dieser Studie untersuchten Einsatzbereiche hinausgehen (bspw. Luftverkehr), aus heutiger Sicht ohnehin nahezu unverzichtbar sein.

### Klimapolitisch und regulatorisch ist eine Öffnung in Richtung Technologieoffenheit erforderlich

Die untersuchten Klimabilanzen von Antriebstechnologien im Bereich der PKW und LNF haben gezeigt, dass ein Technologiemix einer von vornherein limitierten Technologieauswahl vorzuziehen

ist. Für die nachhaltige Minderung der CO<sub>2</sub>-Emissionen ist es sinnvoll und empfehlenswert, den Regulierungsrahmen so zu gestalten, dass nicht nur batterieelektrische Antriebe, sondern auch Antriebe basierend auf E-Fuels (ICEV) gleichberechtigt vorangetrieben werden. Hierfür sind folgende Schritte erforderlich (s. **Abbildung 4**):

**Abbildung 4. Die nächsten Schritte sind entscheidend**



Quelle: Frontier Economics

# 1. ZIEL UND HINTERGRUND DER STUDIE

---

**80-95% Re-**  
**duktion der CO<sub>2</sub>-**  
**Emissionen ggü.**  
**1990 bis 2050**

---

ist das ambitionierte Ziel  
des Klimaschutzplans  
2050 in Deutschland, was  
CO<sub>2</sub>-Minderungen in allen  
Sektoren erfordert – auch  
im Straßenverkehr

---

**0 g(CO<sub>2</sub>) je**  
**gefahrenener km:**

---

emissionsfrei sind BEV  
heute nur bei einge-  
schränkter Sichtweise

---

Hintergrund: Das Pariser Klimaschutzziel legt weltweite Treibhausgas-Neutralität nach 2050 fest – massive THG-Reduktion auch im Verkehrssektor erforderlich.

Im Pariser Klimaschutzabkommen hat sich die Weltgemeinschaft das Ziel gesetzt, im Laufe der zweiten Hälfte dieses Jahrhunderts THG-Neutralität zu erreichen. Die Europäische Union strebt THG-Neutralität bereits bis 2050 an. Deutschland hat sich mit dem Klimaschutzplan 2050<sup>1</sup> zum Ziel gesetzt, die Treibhausgasemissionen bis 2050 um 80% bis 95% gegenüber 1990 zu verringern. Diese Ziele erfordern ambitionierte CO<sub>2</sub>-Reduktionsstrategien in allen energieverbrauchenden Sektoren, einschließlich des Verkehrssektors.

Insbesondere die THG-Emissionen des Straßenverkehrs haben in jüngerer Zeit die politische Aufmerksamkeit auf sich gezogen. Trotz effizienterer Fahrzeuge bewegen sich in Deutschland die CO<sub>2</sub>-Emissionen aus dem Straßenverkehr nach wie vor auf einem ähnlichen Niveau wie 1990. Auf EU-Ebene sind die Emissionen im Verkehrssektor sogar angestiegen. Die Gründe dafür sind in erster Linie die erhöhte Verkehrsleistung im Bereich der Gütertransporte und eine stetig steigende Nachfrage nach individueller Mobilität.

Vor diesem Hintergrund ist eine intensive energiepolitische Debatte entbrannt, mit welchen Konzepten und Technologien im Straßenverkehr eine massive und nachhaltige Reduzierung der Nutzung fossiler Energieträger und damit von CO<sub>2</sub>-Emissionen erreicht werden kann.

Batterieelektrische Fahrzeuge (BEV, battery electric vehicle) werden in Teilen der Politik insbesondere für den Individualverkehr (PKW) als technologische Lösung der Wahl zur Minderung von CO<sub>2</sub>-Emissionen gesehen. In der allgemeinen aktuellen Debatte gelten batterieelektrische Fahrzeuge als CO<sub>2</sub>-emissionsfrei. Diese weit verbreitete Ansicht beruht auf der Tatsache, dass direkt am Fahrzeug, also am Ort der Umwandlung von Endenergie (elektrische Energie) zu Nutzenergie (mechanische Bewegung), keine CO<sub>2</sub>-Emissionen erzeugt werden.

---

<sup>1</sup> Klimaschutzplan 2050 - Klimaschutzpolitische Grundsätze und Ziele der Bundesregierung, [https://www.bmu.de/fileadmin/Daten\\_BMU/Download\\_PDF/Klimaschutz/klimaschutzplan\\_2050\\_bf.pdf](https://www.bmu.de/fileadmin/Daten_BMU/Download_PDF/Klimaschutz/klimaschutzplan_2050_bf.pdf)

Im Unterschied dazu fallen auf dieser Energieumwandlungsstufe bei einem Fahrzeug mit Verbrennungsmotor (ICEV, internal combustion engine vehicle) immer CO<sub>2</sub>-Emissionen an. Dabei stellt der im Kraftstofftank zur Verfügung stehende flüssige Kraftstoff die Endenergie dar, die anschließend in Nutzenergie (mechanische Bewegung) umgewandelt wird.

Bei dieser direkt am Fahrzeug ansetzenden System- bzw. Bilanzierungsgrenze (Tank-to-Wheel) ist folglich der batterieelektrische Antrieb im Vergleich zum verbrennungsmotorischen Antrieb hinsichtlich der CO<sub>2</sub>-Bilanz stets klar im Vorteil.

In wieweit die Beschränkung auf diese engere Systemgrenze direkt am Fahrzeug zielführend ist und zu welchen Ergebnissen ein Ansatz führt, bei dem sämtliche Lebenszyklusabschnitte eines Fahrzeugs berücksichtigt werden, ist Gegenstand dieser Untersuchungen.



## Lebenszyklusanalyse

gibt Aufschluss über die CO<sub>2</sub>-Gesamtbilanz von Antriebstechnologien.

**Zielsetzung: Untersuchung der CO<sub>2</sub>-Bilanz unterschiedlicher Fahrzeugantriebe über den gesamten Lebenszyklus (LCA – Life Cycle Assessment), heute und perspektivisch**

Vor diesem Hintergrund hat der UNITI Bundesverband mittelständischer Mineralölunternehmen e. V. Frontier Economics gebeten, die Klimabilanz verschiedener Antriebsarten über den gesamten Lebenszyklus der Fahrzeuge zu untersuchen. Diese Studie sowie das zugehörige Berechnungstool (Excel-Modell) zeigen Wirkzusammenhänge und Ergebnisse, die zu mehr Transparenz und Vergleichbarkeit von technologischen Lösungsoptionen bezüglich der CO<sub>2</sub>-Emissionen über den Lebenszyklus beitragen sollen. Auf dieser Basis ist die Entwicklung fachlich fundierter und robuster Strategien besser möglich.

Dieser Untersuchungsbericht umfasst folgende inhaltliche Schwerpunkte:

- **Abschnitt 2** beleuchtet grundsätzliche Lösungsansätze für eine nachhaltige CO<sub>2</sub>-Minderung im Straßenverkehr, den aktuellen Stand der energiepolitischen Diskussionen, und zeigt insbesondere die Grenzen der heute geltenden maßgeblichen Analyse- und Regulierungsansätze auf.
- **Abschnitt 3** erläutert das Prinzip von Lebenszyklusanalysen (Life Cycle Assessment, LCA), das – zumindest in Fachkreisen – verstärkt herangezogen wird (von der Tank-to-Wheel hin zur Cradle-to-Grave-Perspektive).
- **Abschnitt 4** vermittelt anhand ausgewählter praktischer Fallbeispiele, dass auf Basis von LCA schon heute und auf absehbare Zeit bezüglich der CO<sub>2</sub>-Emissionen keine Antriebstechnologien allgemeingültig dominant gegenüber anderen Technologien sind, auch nicht das batterieelektrische Fahrzeug gegenüber

Verbrennungstechnologien. Vielmehr ist die Vorteilhaftigkeit von Technologien bezüglich der CO<sub>2</sub>-Emissionen von einer Vielzahl von Faktoren abhängig und damit vom jeweiligen Einzelfall.

- **In Abschnitt 5** werden die Antriebstechnologien vor dem Hintergrund eines zunehmenden Einsatzes von Erneuerbaren Energien (EE) betrachtet, sowohl z.B. für die Herstellung von Strom und Batterien, als auch zur Bereitstellung flüssiger Kraftstoffe durch die Beimischung von grünem, synthetischem Benzin und Diesel.
- **In Abschnitt 6** werden die aus dieser Studie resultierenden Schlussfolgerungen zusammengefasst und die Ergebnisse in einen erweiterten energiepolitischen Kontext eingeordnet, der über die Erfassung der THG-Emissionen hinausgeht.

Auf der Grundlage der LCA-Untersuchungserkenntnisse werden in der Studie Handlungsempfehlungen für die Politik formuliert. Die Studie soll somit die Debatte bezüglich künftiger Lösungen zur CO<sub>2</sub>-Minderung im Verkehrssektor weiter voranbringen.

Der Untersuchungsbericht wird durch ein Berechnungstool ergänzt, welches dem Nutzer ermöglicht, die CO<sub>2</sub>-Bilanz von Fahrzeugen auf Basis eigener Annahmesets für sämtliche Einflussparameter und Szenarien zu ermitteln. Zusätzlich kann mit dem Modell festgestellt werden, mit welcher Sensitivität sich unterschiedliche Parametervariationen und Szenarien auf die CO<sub>2</sub>-Bilanz der Fahrzeuge in den einzelnen Lebenszyklusphasen und insgesamt auswirken können.

## 2. DER ÖFFENTLICHE BLICK AUF LÖSUNGEN FÜR CO<sub>2</sub>-MINDERUNGEN IM STRAßENVERKEHR IST NOCH BESCHRÄNKT

---

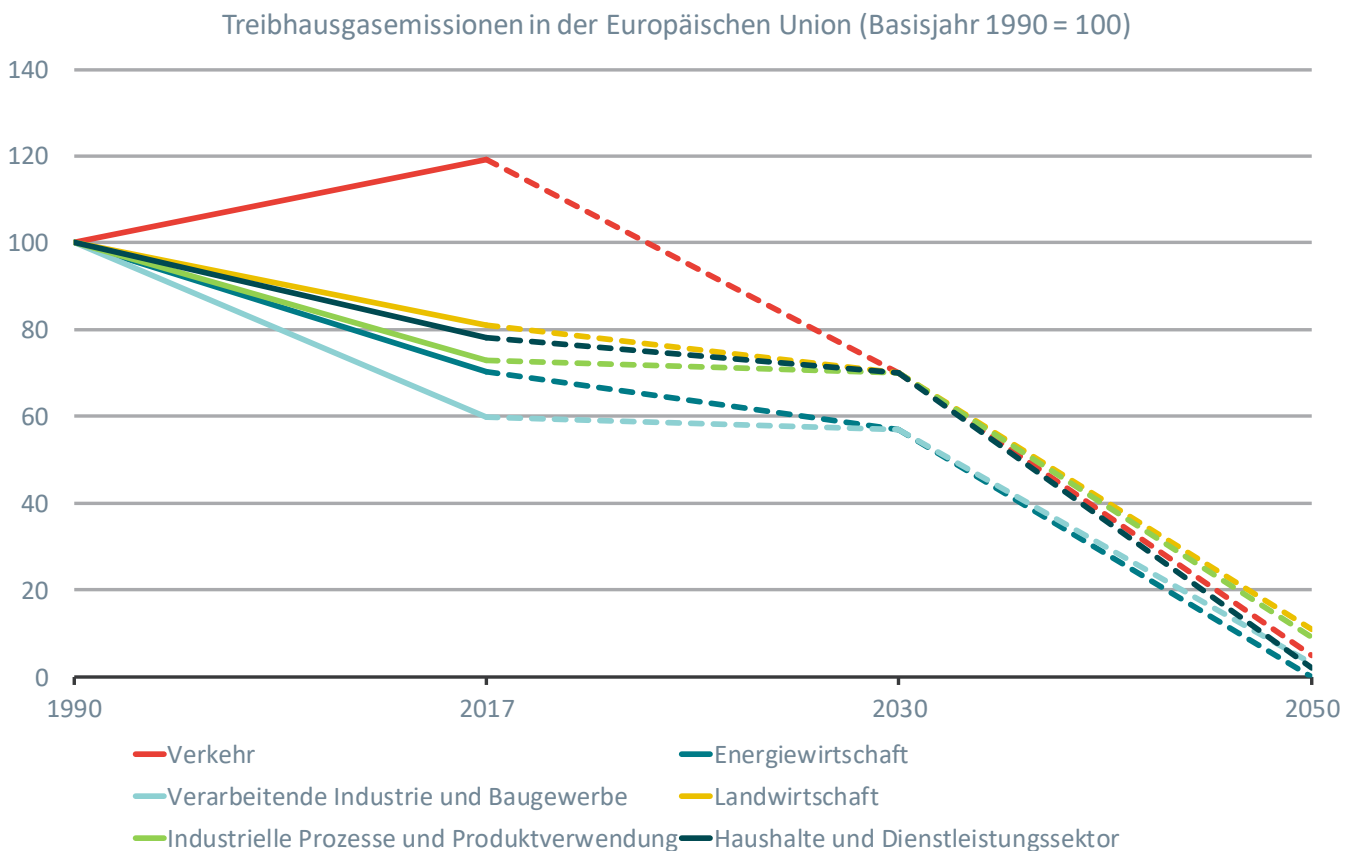
Für die Erreichbarkeit der Klimaziele sind nachhaltige Lösungen zur CO<sub>2</sub>-Minderung im Straßenverkehr essentiell. In diesem Kapitel wird die aktuelle Situation im Verkehrssektor bezüglich der CO<sub>2</sub>-Emissionen sowie die klimapolitischen Herausforderungen erläutert. Die unterschiedlichen Lösungsoptionen werden beleuchtet und Regularien daraufhin geprüft, ob sie es den verschiedenen Technologien ermöglichen zur CO<sub>2</sub>-Vermeidung beizutragen.

### 2.1 Erreichen der Klimaschutzziele erfordert massive CO<sub>2</sub>-Emissionsminderungen auch im Straßenverkehr

Die Transformation des Energiesystems in Deutschland erfordert mittel- bis langfristig eine massive Senkung von Treibhausgasemissionen in allen energieverbrauchenden Sektoren.

Dieses Erfordernis schließt den Straßenverkehr mit ein, der wie der gesamte Mobilitätssektor über die letzten Jahrzehnte in Deutschland stagnierende und in Europa sogar steigende Emissionen seit 1990 verzeichnet (vgl. **Abbildung 5**).

**Abbildung 5. Im europäischen Mobilitätssektor sind die CO<sub>2</sub>-Emissionsminderungen zu beschleunigen, um die Klimaschutzziele 2050 zu erreichen**



Quelle: Frontier Economics auf Basis von Eurostat, Greenhouse gas emissions by source sector.

Hinweis: Basisjahr 1990 = 100.

# 31%

niedriger sind die  
CO<sub>2</sub>-Emissionen pro  
gefahrenem km  
heute im Vergleich zu 2000

bei allerdings gleichzeitig stark  
gestiegener Verkehrsleistung

Dieser Anstieg ist v.a. auf die gestiegene Nachfrage nach individueller Mobilität und die zunehmenden Straßengütertransporte im EU-Binnenmarkt zurückzuführen. Nichtsdestotrotz waren die Anstrengungen zur CO<sub>2</sub>-Minderung im Verkehrssektor erheblich: So konnten zwischen 2000 und 2017 die durchschnittlichen CO<sub>2</sub>-Emissionen pro Kilometer eines verkauften Neuwagens in der EU durch Effizienzsteigerungen um 31%<sup>2</sup> verringert werden. Diese Effizienzgewinne sind allerdings durch die insgesamt gestiegene Verkehrsleistung überkompensiert worden.

Vor diesem Hintergrund ist eine intensive energiepolitische Debatte darum entbrannt, mit welchen Konzepten und mit welchen Technologien der Straßenverkehr zur Minderung der CO<sub>2</sub>-Emissionen in Europa und Deutschland beitragen soll und kann.

<sup>2</sup> Vgl. [https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/daviz/average-emissions-for-new-cars-4#tab-chart\\_1](https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/daviz/average-emissions-for-new-cars-4#tab-chart_1)



99,7%  
der PKW



sind heute in Deutschland  
mit Verbrennungsmotoren  
ausgestattet

## 2.2 Der aktuelle PKW-Bestand mit seinen heutigen Antriebstechnologien nutzt überwiegend Flüssigkraftstoffe

Konzepte und Technologien zur Minderung der CO<sub>2</sub>-Emissionen im Straßenverkehr werden nicht auf einer „grünen Wiese“ geplant und umgesetzt, sondern treffen auf den heutigen Fahrzeugbestand und bestehende Verkehrsinfrastrukturen. Insofern ist es bei Zukunftsstrategien für den Individualverkehr sinnvoll, die derzeitige Situation im Verkehrsbereich zu berücksichtigen.

Der derzeitige Technologiemix für das PKW-Segment besteht heute in Deutschland...<sup>3</sup>

- ...zu 99% aus Fahrzeugen, die mit einem **Verbrennungsmotor** angetrieben werden (ICEV – Internal Combustion Engine Vehicle genannt). Als Antriebsenergie dienen heute vor allem fossile, flüssige Kraftstoffe wie Diesel und Benzin auf Mineralölbasis.<sup>4</sup>
- ... zu 0,2% aus **batterieelektrisch angetriebenen Fahrzeugen** (BEV – Battery Electric Vehicle). Deren Batterien werden mit Strom geladen und das BEV durch einen Elektromotor angetrieben. Der Ladestrom wird heute zu einem wesentlichen Teil durch fossile Energie erzeugt. Erneuerbare Energien machen in Deutschland heute ca. 38% des Strommixes in der Erzeugung aus.<sup>5</sup>
- ... zu weniger als 0,1% aus **Brennstoffzellenfahrzeugen** (FCEV – Fuel Cell Electric Vehicle). Bei FCEV handelt es sich um elektrisch angetriebene Fahrzeuge, deren Strom in einer Brennstoffzelle aus der chemischen Reaktion von Wasserstoff mit einem Oxidationsmittel erzeugt wird. Der heutzutage eingesetzte Wasserstoff wird überwiegend aus Erdgas gewonnen und ist somit nicht klimaneutral (sogenannter grauer Wasserstoff).
- ...zu 0,7% aus **anderen Antriebsformen** wie Hybridvarianten der oben genannten Antriebe oder Fahrzeuge mit anderen, bspw. gasförmigen, Antriebsenergien (CNG, LNG).

Die aktuelle Dominanz der Flüssigkraftstoffe, sowohl in Deutschland als auch international, ist technisch und chemisch-physikalisch begründet. Aufgrund der hohen volumenbezogenen Energiedichte

<sup>3</sup> Die Zahlen basieren auf Daten des Kraftfahrt-Bundesamtes, Stichtag 01. Januar 2019, siehe [https://www.kba.de/DE/Statistik/Fahrzeuge/Bestand/bestand\\_node.html](https://www.kba.de/DE/Statistik/Fahrzeuge/Bestand/bestand_node.html)

<sup>4</sup> Auch gasförmige Kraftstoffe wie Erdgas und Wasserstoff – derzeit meist durch fossiles Erdgas hergestellt („grauer“ Wasserstoff) – können in Verbrennungsmotoren verwendet werden.

<sup>5</sup> Vgl. Umweltbundesamt, <https://www.umweltbundesamt.de/presse/pressemitteilungen/bilanz-2018-anteil-erneuerbarer-energien-steigt-auf>.



## Flüssige Kraftstoffe

haben aufgrund hoher Energiedichte und einfacher Handhabbarkeit anwendungstechnische Stärken

verfügen Flüssigkraftstoffe im Vergleich zu allen anderen heute verfügbaren Energieträgern über:

- hohe Anwendungsflexibilität – in allen Fahrzeugklassen vom PKW bis hin zum Schwerlastverkehr.
- gute Transportierbarkeit – insbesondere bei weiten Strecken von der Erzeugung bis zur Endanwendung.
- gute Lagerfähigkeit mit hoher Energiespeicherkapazität.
- einfaches und nahezu gefahrloses Handling bei atmosphärischen Umgebungstemperaturen und -drücken ohne aufwendige Prozesstechnik.

Diesen Aspekten steht jedoch der Kohlenstoffdioxidgehalt der bei der Verbrennung entstehenden Abgase gegenüber. Ausgehend von dieser Konstellation stellt sich also aus klimapolitischer Sicht die Frage, wie der Mobilitätssektor so gestaltet werden kann, dass die gesetzten Klimaziele erreicht werden können – möglichst ohne die von der Bevölkerung und der Wirtschaft in steigendem Maße nachgefragte Mobilität einzuschränken.

### 2.3 CO<sub>2</sub>-Einsparungen im Verkehr sind auf vielfältige Weise erzielbar und sinnvoll

Um bei dieser Ausgangssituation eine Minderung der CO<sub>2</sub>-Emissionen im erforderlichen Umfang herbeiführen zu können, stehen grundsätzlich verschiedene technische Optionen zur Verfügung:

- **Umstellung auf Fahrzeuge mit kraftstoffsparendem Antrieb:** Effizientere Antriebe sparen – ceteris paribus – CO<sub>2</sub>-Emissionen durch effizientere Kraftstoffnutzung ein. Dazu gehören a) hoch-effiziente Verbrennungsmotoren, b) Elektromotoren, und c) Brennstoffzellen.
- **Umstellung von fossilen auf klimaneutrale Antriebsenergien:** Dazu gehören:
  - **Erneuerbar hergestellter Ladestrom:** Dieser kann in batterieelektrischen Fahrzeugen eingesetzt werden.
  - **Erneuerbar hergestellte Flüssigkraftstoffe:** Herkömmliche Diesel- und Benzinkraftstoffe können durch Bio- oder E-Fuels schrittweise ersetzt werden. Während Bio-Fuels rein auf der Umwandlung von Biomasse basieren,<sup>6</sup> handelt es sich bei E-Fuels um sogenannte synthetische Kraftstoffe, die mittels des Einsatzes von Elektrizität aus Wasser und Kohlenstoff produziert werden. Wenn dabei lediglich regenerativ

<sup>6</sup> Der Anbau von Pflanzen zur reinen energetischen Nutzung ist jedoch in vielerlei Hinsicht umstritten. Das Argument, dass „Energiepflanzen“ in Konkurrenz zum Anbau von Nahrungsmitteln stehen, wird von Kritikern in der Regel zuvorderst genannt.

erzeugter Strom zur Anwendung kommt und der Kohlenstoff zuvor z.B. der Atmosphäre entnommen wurde, gelten E-Fuels als vollständig klimaneutrale<sup>7</sup> Kraftstoffe.

- **Erneuerbar hergestellter, „grüner“ Wasserstoff:** Während „grauer“ Wasserstoff durch Dampfreformierung aus Erdgas hergestellt wird und so in der Produktion Emissionen verursacht, kann Wasserstoff auch klimaneutral hergestellt werden. Grüner oder erneuerbarer Wasserstoff wird durch erneuerbaren Strom und das Elektrolyseverfahren hergestellt.
- **Erneuerbar hergestelltes Methan** (durch Methanisierung von erneuerbar hergestelltem Wasserstoff und Kohlenstoff).

In unserer Studie stellen wir die Optionen „erneuerbar hergestellter Ladestrom“ und „erneuerbar hergestellte Flüssigkraftstoffe“ gegenüber. Wir vergleichen also insbesondere die CO<sub>2</sub>-Emissionen entlang des Lebenszyklus von batterieelektrischen Fahrzeugen, die derzeit oftmals im Fokus der Politik stehen, mit denen von Fahrzeugen mit Verbrennungsmotoren, die von Flüssigkraftstoffen angetrieben werden. Letztere bieten den Vorteil, auf die heute bestehenden Versorgungsinfrastrukturen aufbauen zu können und keine Nutzungsänderungen zu erfordern.<sup>8</sup>

Hierbei betrachten wir die Situation heute wie auch zukünftige Szenarien, in denen die Bereitstellung der Antriebsenergien gemäß den oben aufgezeigten Strategien durch die Verwendung von Erneuerbaren Energien zunehmend grüner wird, und zwar sowohl stromseitig als auch auf Seiten der Flüssigkraftstoffe.



Trotz Vielfalt von Lösungsoptionen für die CO<sub>2</sub>-Minderung liegt der Fokus der politischen Regularien derzeit fast allein auf BEV

## 2.4 Technologische Vielfalt trifft heute auf verengte politische Regularien

Trotz der vielfältigen technologischen Ansätze für die Umsetzung der ambitionierten Klima- und CO<sub>2</sub>-Minderungsziele im Verkehrssektor werden heute in weiten Kreisen der Politik primär batterieelektrische Fahrzeuge, insbesondere für den Individualverkehr (zumeist für PKW), z.T. aber auch im Bus- und Schwerlastverkehr, als alleinige technologische Lösung zur Senkung der Treibhausgasemissionen gesehen. Andere Optionen, wie die Umstellung auf aus Erneuerbaren Energien synthetisch hergestellte Kraftstoffe, werden bislang lediglich nachrangig debattiert.

<sup>7</sup> Synthetische Kraft- und Brennstoffe können hierbei gesamtbilanziell klimaneutral hergestellt und wieder verbrannt werden: Zwar fallen bei der Endnutzung CO<sub>2</sub>-Emissionen an, dieses CO<sub>2</sub> wird jedoch bei der Herstellung der Umwelt entnommen. Die Klimabilanz ist somit ausgeglichen, klimaschädliche Effekte werden nahezu vollständig reduziert.

<sup>8</sup> Auch bei Wasserstoff und Methan sind im Verkehrssektor noch substantiell Infrastrukturen aufzubauen, weshalb wir uns in dieser Studie als Alternative zu den batterieelektrischen Fahrzeugen auf die Flüssigkraftstoffe fokussieren.

Ein Grund für den politischen Fokus auf BEV als Lösung der Wahl könnte daran liegen, dass BEV im Gegensatz zu ICEV in der allgemeinen politischen Wahrnehmung als CO<sub>2</sub>-emissionsfrei gelten. Indizien dafür lassen sich in verschiedenen politischen Ankündigungen und ordnungsrechtlichen Rahmenbedingungen – sowohl auf europäischer als auf nationaler Ebene – erkennen:

- Unter den **EU-Emissionsminderungszielen für PKW** und leichte Nutzfahrzeuge gilt ab 2021 die Vorgabe von durchschnittlich höchstens 95 g(CO<sub>2</sub>)/km je Fahrzeug innerhalb der Fahrzeugflotte eines Autoherstellers (EU-Flottenziele<sup>9</sup>). Unter den Messvorgaben werden BEV als emissionsfrei anerkannt, während es für viele ICEV praktisch unmöglich ist diese Vorgaben zu erreichen. Insbesondere auch, da der Einsatz von Biokraftstoffen und von aus Erneuerbaren Energien hergestellten synthetischen Kraftstoffen nicht oder nur unzureichend auf die Quoten angerechnet werden können.
- Der **Koalitionsvertrag**<sup>10</sup> zwischen CDU, CSU und SPD erwähnt im Kontext der Lösungen für den Mobilitätssektor in erster Linie die Unterstützung von Elektromobilität und den Aufbau einer Stromladeinfrastruktur. So ist auch bereits eine Teststrecke für batterieelektrisch angetriebene LKW in Kombination mit Oberleitungen auf der Autobahn A5 aufgebaut worden und auf der A1 in Vorbereitung. Der Aufbau und Ausbau von Ladeinfrastruktur und die Förderung der Elektromobilität können ohne Zweifel einen Beitrag zur Senkung der CO<sub>2</sub>-Emission im Verkehrssektor leisten, allerdings bleiben alternative Technologien weitestgehend unberücksichtigt. Der einseitige Fokus auf Elektromobilität wird durch den aktuellen Koalitionsvertrag somit verstärkt.
- Aktuell werden in einigen europäischen Ländern mittel- bis langfristig **ICEV-Neuzulassungen in Frage gestellt**, wie z.B. in Norwegen, Irland oder Dänemark. Norwegen strebt ab 2025 eine Neuwagenflotte ganz ohne Verbrennungsmotoren an. Irland, Dänemark und Schweden verfolgen dieses Ziel für 2030, Großbritannien und Frankreich ab 2040. Darüber hinaus werden auch finanzielle Förderanreize sehr stark darauf ausgerichtet Kaufentscheidungen in Richtung BEV zu motivieren.

Dass Regularien und politische Ankündigungen auf europäischer Ebene den Fokus auf das vermeintlich emissionsfreie BEV legen (vgl. **Abbildung 6**), könnte an den folgenden Ursachen liegen:

- Die verbreitete Ansicht, dass BEV emissionsfrei sind, beruht auf der Tatsache, dass am Ort der Umwandlung von Endenergie (elektrische Energie) zu Nutzenergie (mechanische Bewegung



Wegweisende Regularien und politische Ankündigungen in der EU setzen heute auf nur eine Karte.

<sup>9</sup> Vgl. [https://ec.europa.eu/clima/policies/transport/vehicles/cars\\_en](https://ec.europa.eu/clima/policies/transport/vehicles/cars_en)

<sup>10</sup> Vgl. Koalitionsvertrag zwischen CDU, CSU und SPD 19. Legislaturperiode (2018), S.14 <https://www.bundesregierung.de/resource/blob/975226/847984/5b8bc23590d4cb2892b31c987ad672b7/2018-03-14-koalitionsvertrag-data.pdf?download=1>

und sonstige Verbrauchsaggregate), also direkt am Elektrofahrzeug, keine CO<sub>2</sub>-Emissionen entstehen (Tank-to-Wheel-Betrachtung).

- Im Unterschied dazu treten beim Verbrennungsmotor auf dieser Energieumwandlungsstufe stets CO<sub>2</sub>-Emissionen auf. Dabei ist der im Kraftstofftank zur Verfügung stehende flüssige Kraftstoff die Endenergie, die anschließend in Nutzenergie (mechanische Bewegung und sonstige Verbrauchsaggregate) umgewandelt wird.

Abbildung 6. Europäische Politik und ordnungsrechtliche Regularien setzen den Fokus heute auf die Tank-to-Wheel-Emissionsbilanzierung



Quelle: Frontier Economics

Bei der Festlegung der engeren Systemgrenze „Tank-to-Wheel“ ist folglich der batterieelektrische Antrieb im Vergleich zum Verbrennungsmotor hinsichtlich der CO<sub>2</sub>-Emissionen stets eindeutig im Vorteil. Nicht berücksichtigt werden bei dieser Betrachtung allerdings bislang folgende Umstände:

- Wird der gesamte Lebenszyklus (Cradle-to-Grave) betrachtet, entstehen auch beim BEV, insbesondere bei der Batterieherstellung und der Erzeugung des Ladestroms, relevante Mengen an Treibhausgasemissionen.
- Die Rohstofffrage und die Frage der Entsorgung von Komponenten (z.B. der Batterien) sind heute nahezu ungeklärt. Energieaufwendiges Recycling der Batterien könnte zunehmend erforderlich werden.
- Die CO<sub>2</sub>-Bilanz des ICEV könnte sich z.B. mit dem Einsatz von synthetischen Kraftstoffen maßgeblich verbessern.

Eine erweiterte Perspektive auf die Technologieoptionen, die grundsätzlich auf dem Weg zur Treibhausgasneutralität zur Verfügung stehen, scheint deshalb geboten.

## 3. DER WECHSEL VON DER FROSCH- ZUR VOGELPERSPEKTIVE IST EINGELEITET UND SCHREITET VORAN

---

Im vorgehenden Abschnitt haben wir verschiedene Optionen zur CO<sub>2</sub>-Vermeidung im Straßenverkehr erläutert, wobei sich derzeit die verkehrspolitischen Strategien zum Klimaschutz in diesem Bereich stark auf die Elektrifizierung des Verkehrs fokussieren. Wir haben zudem festgestellt, dass das Rational für eine Fokussierung auf die Elektrifizierung auf einer sehr eingeschränkten Sichtweise auf die CO<sub>2</sub>-Emissionen von Fahrzeugen bzw. Antriebstechnologien beruht, nämlich auf den Emissionen am Fahrzeug selbst.

In diesem Abschnitt erweitern wir die Perspektive und erläutern mit dem Konzept der Lebenszyklusanalyse eine ganzheitliche Betrachtungsweise. Auf dieser Grundlage kann das Risiko einseitiger strategischer Fehlentscheidungen und Fehlsteuerungen im Verkehrssektor, die meist mit sehr kostspieligen Korrekturen verbunden sind, reduziert werden. Eine solche ganzheitliche Betrachtungsweise empfiehlt sich auch bei der strategischen Ausrichtung des Verkehrssektors im Kontext der festgelegten THG-Reduktionsziele.

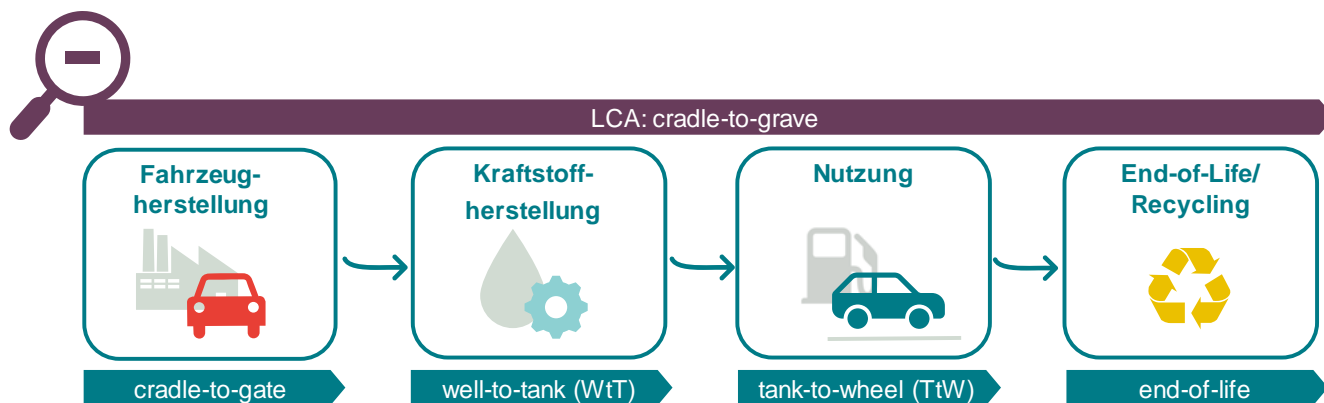
### 3.1 Eine ganzheitliche Lebenszyklusanalyse ist die Grundlage für robuste Strategien und tragfähige Konzepte

Ziel einer umfassenden Technologieanalyse ist es, Technologieoptionen hinsichtlich ihrer Klima- und Umwelteffekte möglichst ganzheitlich zu betrachten und zu bewerten. Bei der ganzheitlichen Lebenszyklusanalyse werden folgende Bereiche berücksichtigt:

- **Lebenszyklusabschnitte:** Es werden alle Lebenszyklusabschnitte eines Fahrzeugs einbezogen (**Abbildung 7**). Beispielsweise werden nicht nur die CO<sub>2</sub>-Emissionen erfasst, die durch die Verbrennung des Kraftstoffs während des Fahrens auf der Straße verursacht werden, sondern z.B. auch die Emissionen, die bei der Erzeugung der Antriebsenergie entstehen.
- **Zeitkomponente:** Zeitlich variable Aspekte müssen auch variabel erfasst werden. Die CO<sub>2</sub>-Intensität der Energieträger z.B. verändert sich über die Nutzungsjahre abhängig vom Anteil der erneuerbar hergestellten Energieanteile.

- **Geografien:** Einzelne Lebenszyklusabschnitte des betrachteten Fahrzeuges (insbesondere Herstellung und Nutzung) können in unterschiedlichen geografischen Regionen mit unterschiedlichen Voraussetzungen im Strom- und Energiemix stattfinden. Der ganzheitliche Ansatz erfasst CO<sub>2</sub>-Emissionen über Länder- und Regionsgrenzen hinweg. So werden Batterien heute mit hohem Stromeinsatz, und damit hohen CO<sub>2</sub>-Emissionen, außerhalb Europas hergestellt und nach Europa exportiert (siehe unten). Die Emissionen werden dann außerhalb Europas bilanziert, während das Produkt – die Batterien – von Verbrauchern in Europa genutzt wird. Dieser „Export“ von CO<sub>2</sub>-Emissionen in andere Weltregionen lässt die CO<sub>2</sub>-Bilanz Europas besser erscheinen, ist aber für den Klimaschutz kontraproduktiv. Lebenszyklusanalysen erfassen diese Effekte.

Abbildung 7. Ganzheitlicher Untersuchungsansatz mit Berücksichtigung aller Lebenszyklusabschnitte eines Fahrzeuges bei der CO<sub>2</sub>-Bilanzierung



Quelle: Frontier Economics

Beim LCA Ansatz für Fahrzeuge (in dieser Studie PKW und leichte Nutzfahrzeuge) wird die Bilanzierungsgrenze der **Nutzungsphase** um folgende, systemimmanente Lebenszyklusabschnitte erweitert (s. **Abbildung 8**):

- **Fahrzeugherstellung (Cradle-to-Gate):** Wir fokussieren in unserer Analyse auf die CO<sub>2</sub>-Emissionen der Herstellung der Komponenten der verschiedenen Antriebsysteme und der Karosserie sowie pauschal anderer Fahrzeugkomponenten wie z.B. der Ausstattung der Fahrzeuge. Beim BEV verursacht in diesem Zusammenhang insbesondere die Batterieherstellung CO<sub>2</sub>-Emissionen durch
  - die relativ energieintensive Herstellung der Batterien; und
  - die Nutzung von Strom aus erneuerbaren, aber auch aus fossilen Anteilen. Heute erfolgt die Batterieherstellung überwiegend in Asien (ca. 85% der Produktionskapazitäten befinden sich in China, Japan, Südkorea<sup>11</sup>).

<sup>11</sup> Siehe <https://boerse.ard.de/anlagestrategie/branchen/zweites-grossprojekt-fuer-batterie-zellfertigung-in-europa100.html> .

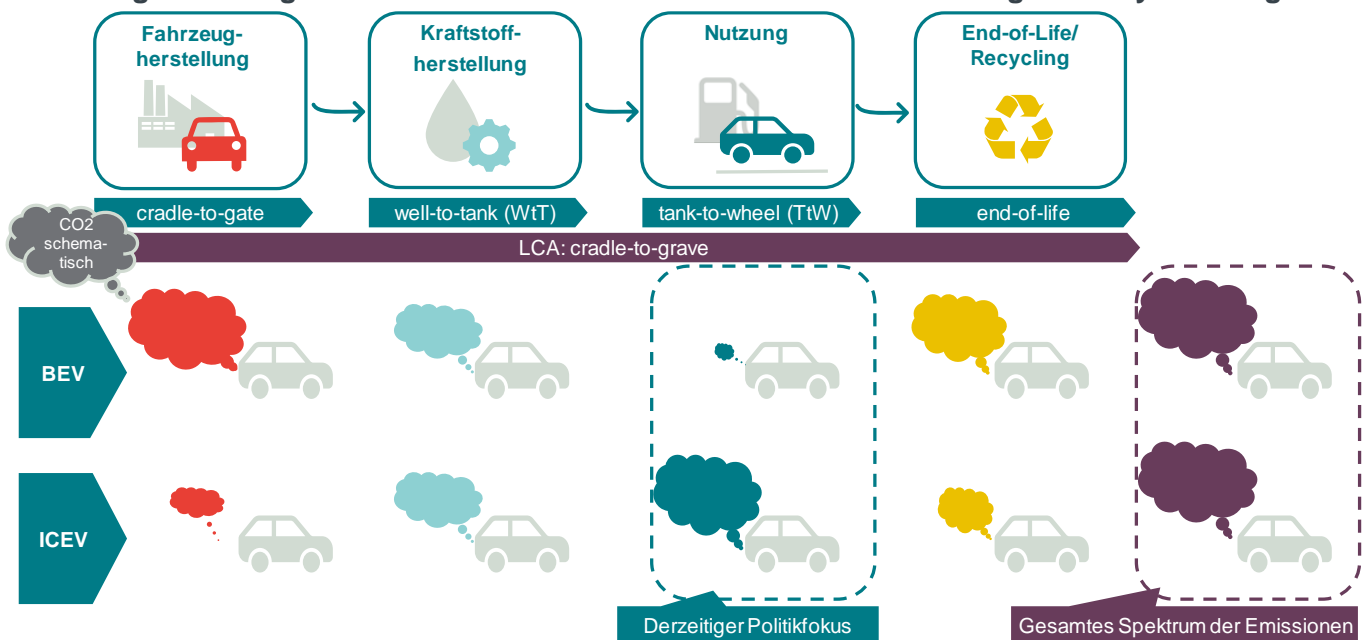
**486** g(CO<sub>2</sub>)/kWh

betrug die durchschnittliche CO<sub>2</sub>-Emission für den Strommix in Deutschland 2017<sup>12</sup>

- **Erzeugung der Antriebsenergie (Well-to-Tank):** Die Herstellung des benötigten Kraftstoffs bzw. des Ladestroms. Hierbei ist ebenfalls der Strommix zu berücksichtigen, der in der Region des Fahrzeugbetriebs zur Verfügung steht. Für die deutsche Ladestromherstellung werden z.B. heute 486 g(CO<sub>2</sub>) pro hergestellter Kilowattstunde Strom emittiert.
- **Entsorgung/Recycling (End-of-Life):** Bisher gibt es wenig Erfahrungswerte zur Effizienz von Recycling- oder Entsorgungsprozessen von Batterien eines BEV. Erfahrungen kommen vor allem vom Hybridantrieb, dessen Batterie jedoch oft 20- bis 40-mal kleiner ist als die Batterie eines rein batterieelektrischen Fahrzeugs und meist auf anderen Materialzusammensetzungen beruht. Voraussichtlich ist dieser Schritt im Lebenszyklus deutlich energieintensiver als beim ICEV, da das Batteriemodul eines Elektroautos komplex aufgebaut und nur sehr schwer und unter hohem Energieaufwand in seine Einzelteile zerlegbar ist.

Es ist zu erwarten, dass unter Berücksichtigung dieser Lebenszyklusphasen im Rahmen der LCA die Technologieanalyse und -bewertung zu anderen Ergebnissen und Erkenntnissen führt als bei einer reinen Fokussierung auf die Nutzungsphase des Fahrzeugs (Tank-to-Wheel).

Abbildung 8. LCA geben Aufschluss über reale CO<sub>2</sub>-Bilanzen und ermöglichen Systemvergleiche



Quelle: Frontier Economics

Hinweis: Dies ist eine schematische Darstellung.

<sup>12</sup> Vgl. Umweltbundesamt (2019). Hierbei werden die CO<sub>2</sub>-Emissionen, die durch den Aufbau der EE-Anlagen wie Solar- oder Windkraftanlagen jedoch – im Gegensatz zu unseren Modellwerten – noch nicht berücksichtigt.

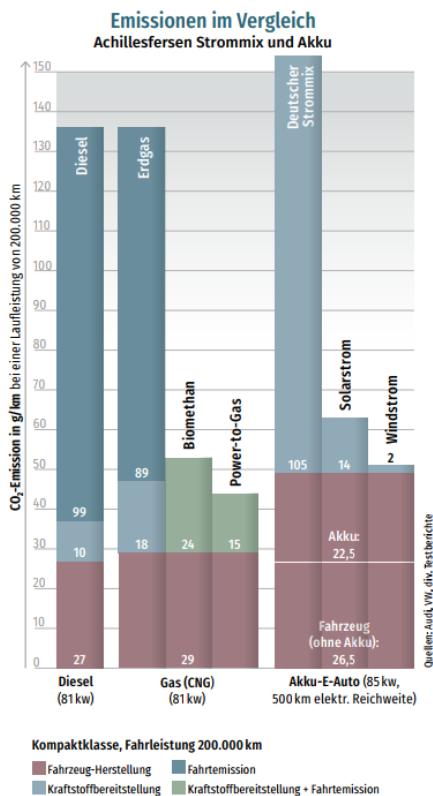


## 3.2 Dieses Jahr hat sich der Fokus der öffentlichen Debatte bereits erweitert

Während, wie in Kap. 2.4 beschrieben, ordnungsrechtliche Regularien und politische Debatten heute stark auf vermeintlich emissionsfreie BEV setzen, hält in der öffentlichen, wissenschaftlichen und medialen Debatte zunehmend eine erweiterte Systembetrachtung Einzug. So stellen Fachexperten zunehmend auf ganzheitliche Analyseansätze bei der Ermittlung der Klimabilanz im Bereich der Antriebstechnologien im Verkehrsbereich ab:

- In der **wissenschaftlichen Literatur** werden bereits seit längerem LCA zu Treibhausgasemissionen der verschiedenen Antriebsarten erstellt. Nur ein Beispiel von vielen ist eine Veröffentlichung der Autoren Ellingsen, Singh und Stromman (2016), die zeigt, dass der elektrische Antrieb nicht per se klimafreundlicher ist als der Verbrennungsmotor, sondern die Treibhausgasbilanz von verschiedenen Annahmen abhängig ist, u.a. vom Fahrzeugsegment, von der Batteriegröße oder der Lebensfahrleistung.
- Zudem gewinnt das Thema in der **öffentlichen und politischen Debatte** an Aufmerksamkeit. Institute wie das Ifo Institut (April 2019), Fraunhofer ISI (Februar 2019) sowie das ifeu (April 2019) betrachten nicht nur die Emissionen bei der Fahrzeugnutzung (Tank-to-Wheel), sondern auch den Treibhausgasausstoß bei der Fahrzeug- und Kraftstoffherstellung. Selbst das Magazin des Deutschen Alpenvereins hat in einem Artikel mit dem Titel „Berg-Auto-Zukunft?“ festgestellt, dass mit Verweis auf den derzeitigen deutschen Strommix „korrekt betrachtet, [...] derzeit Batterie-Elektroautos kein echter Gewinn für die Umwelt [sien]“.<sup>13</sup>

Abbildung 9.  
Emissionen im Vergleich



Quelle: Panorama - Das Magazin des Deutschen Alpenvereins, März 2019, 71. Jahrgang, S. 14

## 3.3 Unsere Untersuchung soll zu weiterer Transparenz und Kenntnisk Gewinnung beitragen

Ziel unserer Untersuchungen ist es, die CO<sub>2</sub>-Bilanz durch Berücksichtigung relevanter Einflussgrößen für die Antriebstechnologien BEV und ICEV in den Lebenszyklusabschnitten heute und perspektivisch zu ermitteln.

Der Analyse liegt ein Berechnungstool zugrunde, das folgende Parameter berücksichtigt und damit die aus heutiger Sicht relevanten Einflussgrößen für eine LCA abdeckt:

- **Fahrzeugklasse:** Berücksichtigt werden in dieser Version zunächst innerhalb des PKW-Segments die Kompaktklasse, die

<sup>13</sup> Panorama - Das Magazin des Deutschen Alpenvereins, März 2019, 71. Jahrgang, S. 12.

Mittelklasse, die SUV-Klasse und zudem die Klasse der leichten Nutzfahrzeuge (LNF).<sup>14</sup>

- **Zulassungsjahr und Nutzung des Fahrzeugs:** Beginnend mit dem Jahr 2020 kann die Fahrzeugzulassung bis zum (derzeit) letzten Anschaffungszeitpunkt 2040 festgelegt werden. Die Nutzungsdauer kann beliebig gewählt werden, wobei 2050 das letzte abgebildete Jahr ist. Daher beträgt die Nutzungsdauer für ein 2040 zugelassenes Fahrzeug maximal 10 Jahre.
- **Batteriekapazität:** Prinzipiell ergibt sich in unserem Tool die der CO<sub>2</sub>-Berechnung zugrundeliegende Batteriekapazität automatisch aus der Wahl der Fahrzeugklasse. Diese Voreinstellung basiert auf den repräsentativen, heute auf dem BEV-Markt verfügbaren Batteriekapazitäten. Nutzer haben darüber hinaus aber auch die Möglichkeit, eigene Annahmen hinsichtlich der Batteriegröße zu treffen und diese im Modell zu hinterlegen.
- **Jahresfahrleistung:** Die Jahresfahrleistung kann beliebig gewählt werden.
- **Kraftstoffe, Herstell- und Betriebsland:** Das Parameterset wird durch die Kraftstoffwahl (hier besteht zusätzlich die Option die Beimischung von E-Fuels zu modellieren), die Wahl des Herstellungs- und Betriebslands sowie die Entwicklung des Strom- und Energiemixes vervollständigt.<sup>15</sup>

Das Tool ermöglicht die Abschätzung von Sensitivitäten auf die CO<sub>2</sub>-Bilanz der betrachteten Technologien bei Variation von einzelnen Einflussparametern.<sup>16</sup> So können derzeitig verwendete Annahmen bei neuen Erkenntnissen überschrieben werden.

Folgende Sachverhalte deckt die Untersuchung bislang nicht ab:

- Der Fokus der Analyse liegt auf der Berechnung von CO<sub>2</sub>-Emissionen. Weitere umwelt- und klimawirksame Aspekte wie zum Beispiel der Wasser- oder Rohstoffverbrauch sind nicht berücksichtigt.
- Als Antriebstechnologien werden in dem Modell Benzin- und Diesel-ICEV sowie mit Strom angetriebene BEV berücksichtigt. Wasserstoff- oder Erdgas-ICEV, FCEV oder Hybride gehen nicht in die Analyse ein.
- Die Analyse geht nur bis zu einem gewissen Detailgrad. Nicht abgedeckt ist bspw. der detaillierte Zellaufbau für die unterschiedlichen im Markt eingesetzten Batterien (vgl. Anhang C).
- Einzelne, untergeordnete Wertschöpfungsstufen wie CO<sub>2</sub>-Emissionen beim Aufbau der Energieinfrastruktur (z.B. Stromnetze), Ladesäulen, Tankstellen etc. gehen nicht in die Analyse ein. In

<sup>14</sup> Entsprechend der Kategorisierung des Kraftfahrtbundesamtes

<sup>15</sup> Gemäß Szenarien des World Energy Outlook (WEO) der International Energy Agency (IEA).

<sup>16</sup> Weitere Erläuterungen zum Berechnungstool siehe auch Anhang B.

den Berechnungen erfasst sind also v.a. die identifizierten Haupttreiber für CO<sub>2</sub>-Emissionen entlang des Lebenszyklus der Fahrzeuge.

## 4. AUS DER VOGELPERSPEKTIVE ERGEBEN SICH HEUTE SCHON NEUE ERKENNTNISSE

Beim Wechsel von der Frosch- zur Vogelperspektive verschiebt sich, wie beschrieben, der Fokus bei der Beurteilung von CO<sub>2</sub>-Emissionen vom Tank-to-Wheel hin zum LCA- bzw. Cradle-to-Grave-Ansatz. Im Folgenden fassen wir die wesentlichen Ergebnisse unserer LCA-Analysen zusammen. Es zeigt sich, dass bei erweiterter Betrachtung die Vorteilhaftigkeit einzelner Technologien von vielen Treibern und vom jeweiligen betrachteten Einzelfall abhängt und damit weit weniger eindeutig ist, als dies in der derzeitigen energiepolitischen Debatte häufig angenommen wird.

### 4.1 Bei ganzheitlicher Betrachtung sind die CO<sub>2</sub>-Emissionen bei batterieelektrischen Fahrzeugen unerwartet hoch

Wie bereits dargestellt, unterliegt der öffentlichen energiepolitischen Debatte heute vielfach die Annahme, dass batterieelektrische Fahrzeuge keine CO<sub>2</sub>-Emissionen mit sich bringen. Dies ist aber nicht der Fall, wie eine LCA am Beispiel eines BEV – hier der Mittelklasse (**Abbildung 9**) – ersichtlich wird. Es fallen vielmehr auch bei BEV deutliche CO<sub>2</sub>-Emissionen an:

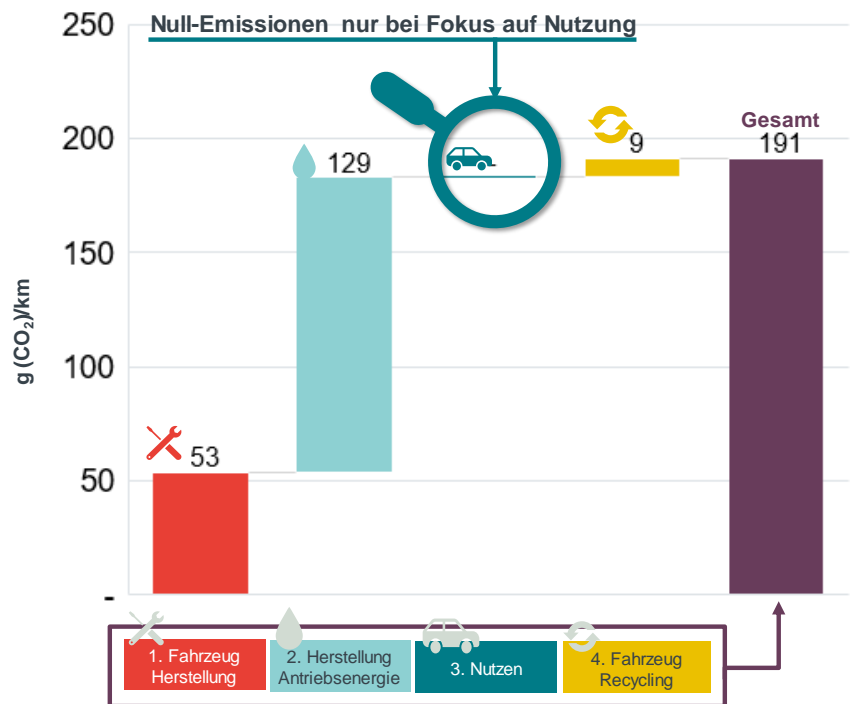
- In der **Nutzungsphase** weist ein BEV 0 g(CO<sub>2</sub>)/km CO<sub>2</sub>-Emissionen auf.
- Über den **kompletten Lebenszyklus** des BEV dagegen beträgt die CO<sub>2</sub>-Bilanz 191 g(CO<sub>2</sub>)/km (**Abbildung 10**). Dabei fallen
  - bei der Fahrzeugherstellung - insbesondere der Batterie - 53 g(CO<sub>2</sub>)/km an (Annahme hier: Die Batterie wird in der EU hergestellt);
  - bei der Herstellung der Antriebsenergie (hier des Ladestroms) in Deutschland 129 g(CO<sub>2</sub>)/km an: Dies ist insbesondere dahingehend bemerkenswert, da eine „dynamische“ Entwicklung des Strommixes unterstellt wird. Bei einem „dynamisch“ gewählten Strommix wird angenommen, dass dessen CO<sub>2</sub>-Intensität stetig durch weiteren EE-Ausbau gemäß den Szenarien reduziert wird. Das bedeutet also, dass der Ladestrom von Jahr zu Jahr mit immer geringeren CO<sub>2</sub>-Emissionen in die Klimabilanz eingeht; und
  - beim Recycling 9 g(CO<sub>2</sub>)/km an.

**191** g(CO<sub>2</sub>)/km

und nicht 0 g(CO<sub>2</sub>)/km

beträgt die CO<sub>2</sub>-Bilanz eines beispielhaften BEV Mittelklassewagens heute

Abbildung 10. CO<sub>2</sub>-Gesamtbilanz am Beispiel eines BEV der Mittelklasse



Quelle: Frontier Economics

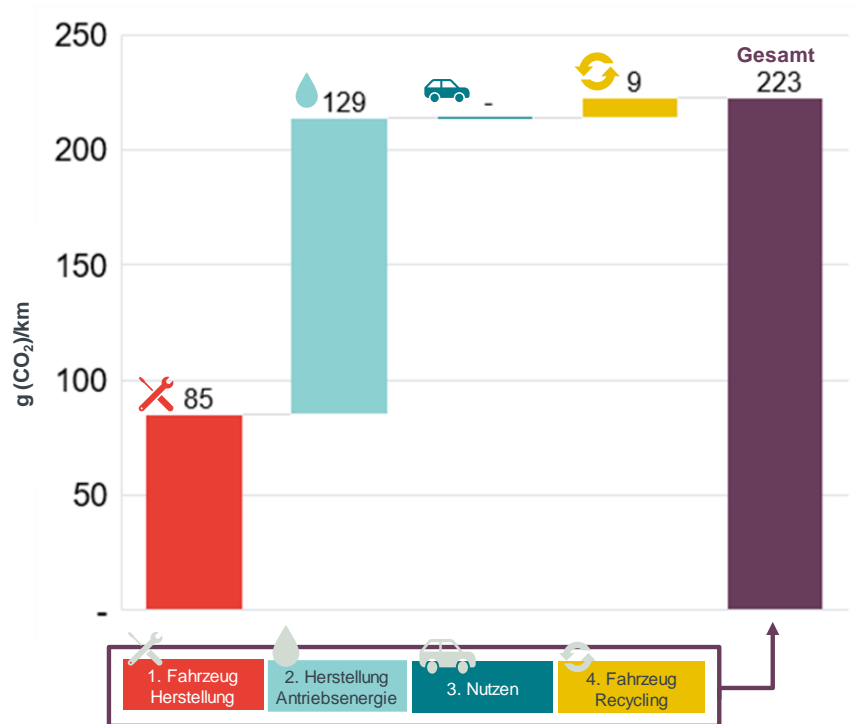
Hinweis: Fahrzeugtyp: Mittelklasse, Jahr der Anschaffung: 2020, Nutzungsdauer: 10 Jahre, Jahresleistung: 15.000 km, Betriebsland: Deutschland (Referenzszenario), Herstellungsland Batterie: EU (Referenzszenario), Dynamisch



Die Nutzungsphase eines Fahrzeuges allein hat nur geringe Aussagekraft für die Emissionsbilanz

Da in diesem Szenario angenommen wird, dass die Batterieherstellung in der EU stattfindet, wird für den hierfür benötigten Strombedarf der vergleichsweise klimagünstige europäische Strommix verwendet. Wie jedoch bereits erwähnt, befinden sich heute ca. 70% der Produktionskapazitäten für BEV-Batterien in Asien. Wird für den Lebenszyklusabschnitt „Fahrzeugherstellung“ z.B. der chinesische Strommix ausgewählt, steigen die CO<sub>2</sub>-Emissionen des BEV für den gesamten Lebenszyklus rechnerisch auf 223 g(CO<sub>2</sub>)/km (**Abbildung 11**).

Abbildung 11. CO<sub>2</sub>-Gesamtbilanz am Beispiel eines BEV der Mittelklasse – Sensitivität Herstellungsland Batterie: China



Quelle: Frontier Economics

Hinweis: Fahrzeugtyp: Mittelklasse, Jahr der Anschaffung: 2020, Nutzungsdauer: 10 Jahre, Jahresleistung: 15.000 km, Betriebsland: Deutschland (Referenzszenario), Herstellungsland Batterie: China, Dynamisch

Insgesamt zeigt sich, dass die Fokussierung auf die Nutzungsphase (wie in Kap. 2.4 beschrieben) zu einer wenig aussagekräftigen CO<sub>2</sub>-Bilanzierung führt. Ganzheitliche Analysen sind für Technologiebewertungen also essenziell.

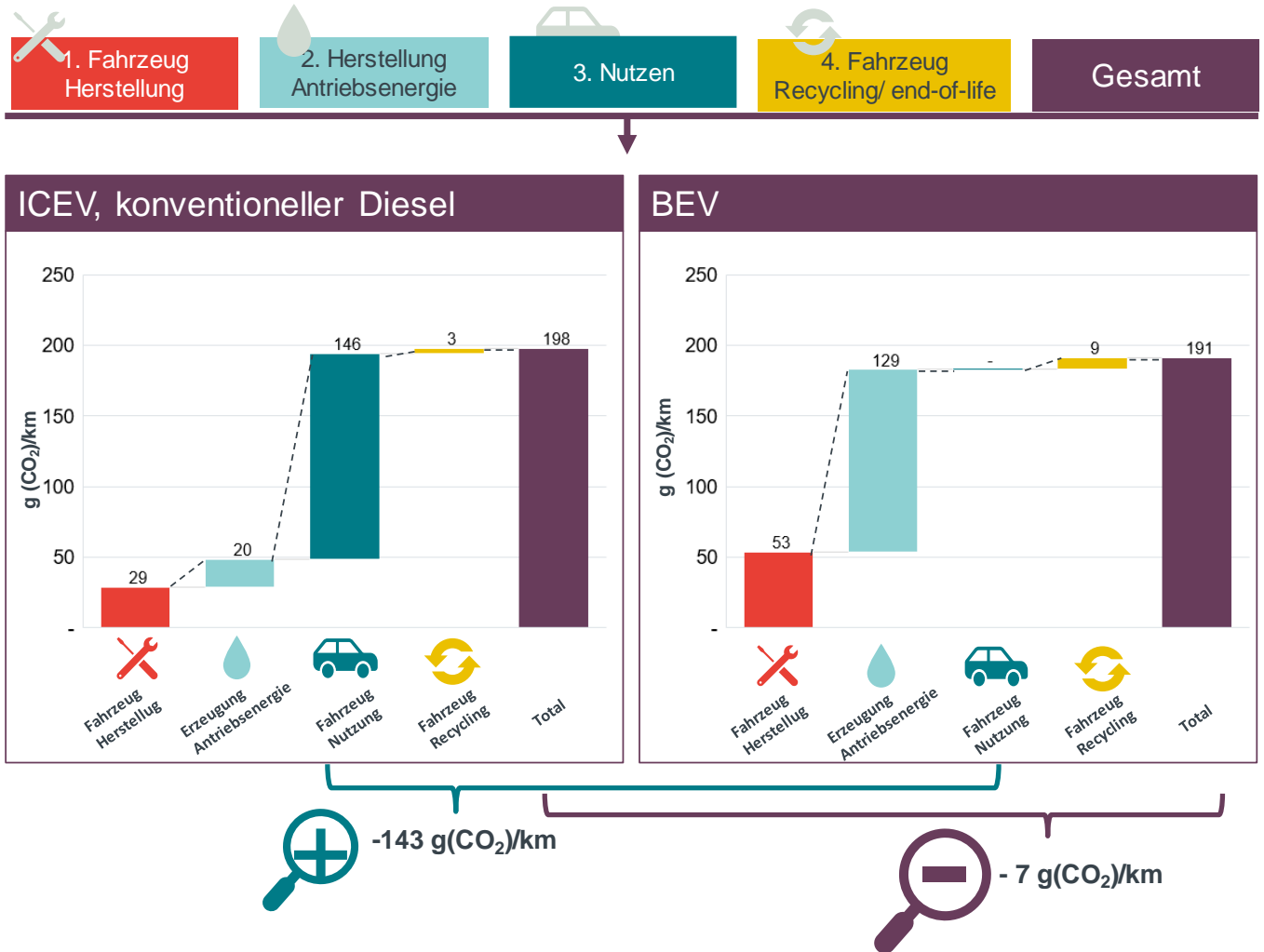
## 4.2 Die Vorteilhaftigkeit von BEV vs. ICEV variiert stark mit dem Einzelfall

Beim Vergleich unterschiedlicher Technologien zeigt sich, dass unter Berücksichtigung des LCA-Ansatzes die Gesamtemissionen der BEV heute und in den nächsten Jahren in vielen Fällen auf einem ähnlichen Niveau wie Fahrzeuge mit Verbrennungsmotor sind. So betragen die CO<sub>2</sub>-Emissionen eines Mittelklassewagens **198** g(CO<sub>2</sub>)/km bei einem Diesel-Verbrenner und **191** g(CO<sub>2</sub>)/km bei einem BEV (**Abbildung 12**). Die geringe Differenz der Emissionen liegt daran, dass

- die Mehremissionen des ICEV aus der Fahrzeugherstellung deutlich geringer als die des BEV sind, da die energieintensive Batterieherstellung wegfällt (+24 g(CO<sub>2</sub>)/km).

- Mehrmissionen aus der Herstellung des Dieselmotors ebenfalls geringer sind als bei der Herstellung des deutschen Ladestroms (+109 g(CO<sub>2</sub>)/km).
- Mehrmissionen in der Entsorgung ähnlich sind.

Abbildung 12. Unterschiede der CO<sub>2</sub>-Emissionen zwischen BEV und ICEV sind in vielen Fällen heute und in den nächsten Jahren relativ gering

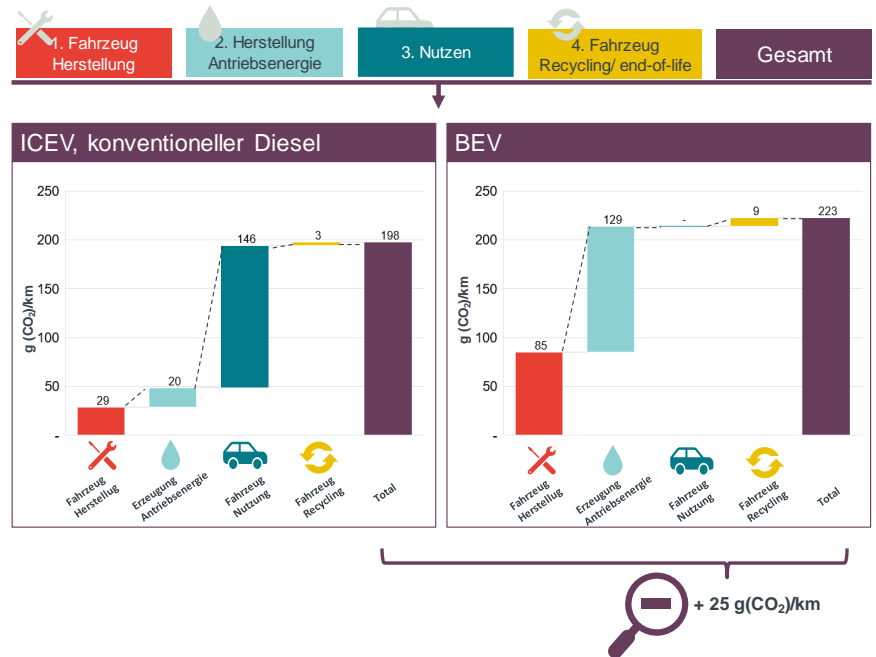


Quelle: Frontier Economics

Hinweis: Fahrzeugtyp: Mittelklasse, Jahr der Anschaffung: 2020, Nutzungsdauer: 10 Jahre, Jahresleistung: 15.000 km, Kraftstoff: Diesel, Betriebsland: Deutschland (Referenzszenario), Herstellungsland Batterie: EU (Referenzszenario), Dynamisch

Das Ergebnis kann sich allerdings leicht mit einer Variation der Annahmen ändern. So ist das BEV gegenüber dem ICEV im Nachteil, wenn die Batterie für das Fahrzeug nicht in Europa, sondern z.B. in China – mit dem dort vorherrschenden Strommix – gebaut wird (vgl. **Abbildung 13**).

**Abbildung 13. Die Herstellung der Batterie in China verschlechtert die CO<sub>2</sub>-Bilanz des BEV**



Quelle: Frontier Economics

Hinweis: Fahrzeugtyp: Mittelklasse, Jahr der Anschaffung: 2020, Nutzungsdauer: 10 Jahre, Jahresleistung: 15.000 km, Kraftstoff: Diesel, Betriebsland: Deutschland (Referenzszenario), Herstellungsland Batterie: China (Referenzszenario), Dynamisch

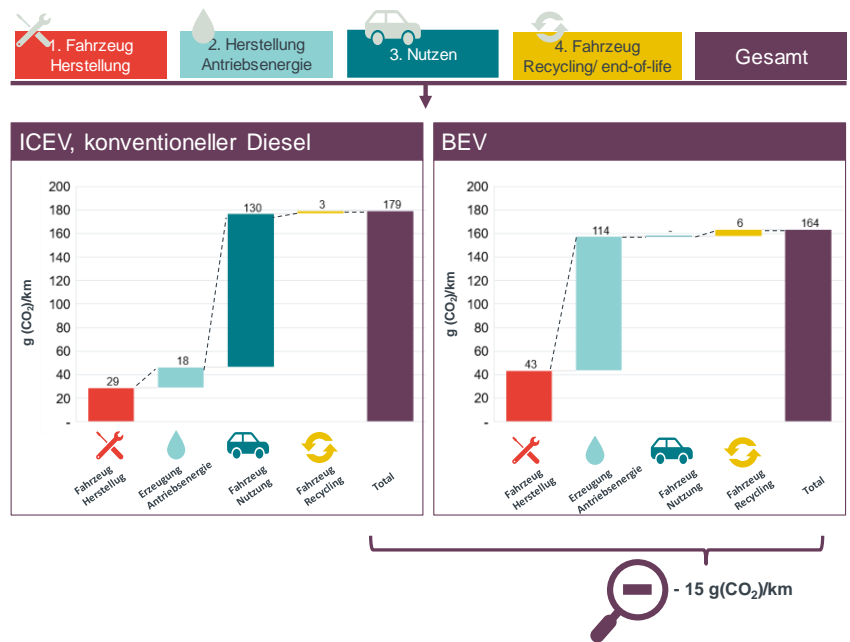
Nachfolgende Fallbeispiele, bei denen lediglich die Fahrzeugklasse variiert wird, bestätigen das Ergebnis: Die jeweilige Vorteilhaftigkeit der Technologien variiert stark je nach Fallbeispiel und Annahmen.



### Fallbeispiel Kompaktklasse

Aufgrund der verhältnismäßig geringen Emissionen bei der Batterieherstellung (Annahme ist, dass in diesem Fall eine relativ kleine Batterie verbaut wird), ist ein Kompaktklasse BEV aktuell im Vorteil gegenüber einem vergleichbaren ICEV. Der Vorteil beträgt auf Basis der getroffenen Annahmen 15 g(CO<sub>2</sub>)/km hinsichtlich der km-bezogenen CO<sub>2</sub>-Emissionen gegenüber dem ICEV.

**Abbildung 14. Aufgrund der verhältnismäßig geringen Emissionen bei der Batterieherstellung ist ein Kompaktklasse BEV aktuell im Vorteil gegenüber einem vergleichbaren ICEV**

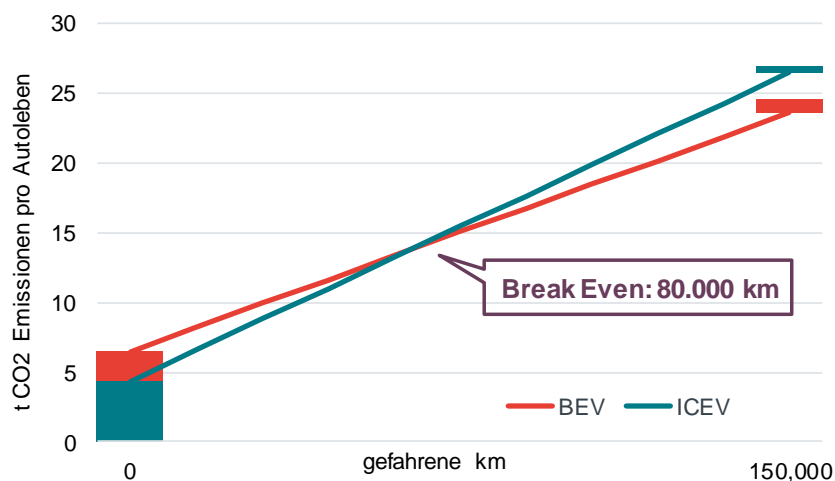


Quelle: Frontier Economics

Hinweis: Fahrzeugtyp: Kompaktklasse, Jahr der Anschaffung: 2020, Nutzungsdauer: 10 Jahre, Jahresleistung: 15.000 km, Kraftstoff: Diesel, Betriebsland: Deutschland (Referenzszenario), Herstellungsland Batterie: EU (Referenzszenario), Dynamisch

Bis zu einer Gesamtfahrleistung von ca. 80.000 km weist das ICEV hinsichtlich der Gesamtemissionen einen Vorteil auf. Ab diesem Zeitpunkt verbessert sich mit jedem weiteren gefahrenen Kilometer die CO<sub>2</sub>-Gesamtbilanz zugunsten des BEV (**Abbildung 14** und **Abbildung 15**)

**Abbildung 15. Nach 80.000 km liegen die Emissionen des Kompaktklasse BEV unter denen des ICEV**



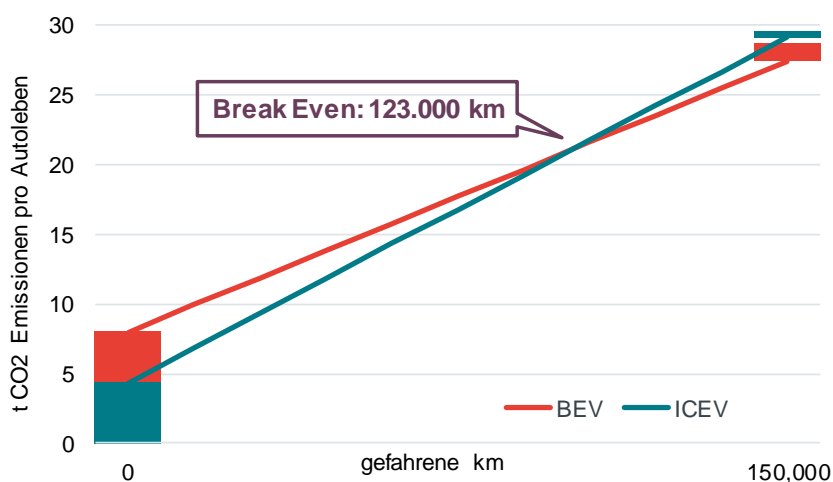
Quelle: Frontier Economics

Hinweis: Fahrzeugtyp: Kompaktklasse, Jahr der Anschaffung: 2020, Nutzungsdauer: 10 Jahre, Jahresleistung: 15.000 km, Kraftstoff: Diesel, Betriebsland: Deutschland (Referenzszenario), Herstellungsland Batterie: EU (Referenzszenario), Dynamisch

### Fallbeispiel Mittelklasse

Im Vergleich zur Kompaktklasse vermindert sich bei der Mittelklasse die Differenz zwischen den Emissionen des BEV und des ICEV zu Gunsten des ICEV (Analyse vgl. Kapitel 4.2). Bei dem gewählten Parameterset (**Abbildung 16**) vergrößert sich die erforderliche Fahrleistung, ab der das BEV hinsichtlich der Gesamtemissionen besser abschneidet. Diese Fahrleistung liegt mit etwa 123.000 km nahe dem Ende der rechnerisch zugrunde gelegten Nutzungsdauer des betrachteten Mittelklasse-Fahrzeugs und um etwa 43.000 km höher als bei der Kompaktklasse. Ein wesentlicher Einflussfaktor ist die höhere Batteriekapazität und die damit verbundenen Emissionen bei der Herstellung.

**Abbildung 16. Bei einem Mittelklassefahrzeug liegt der Break-Even-Punkt deutlich später**



Quelle: Frontier Economics

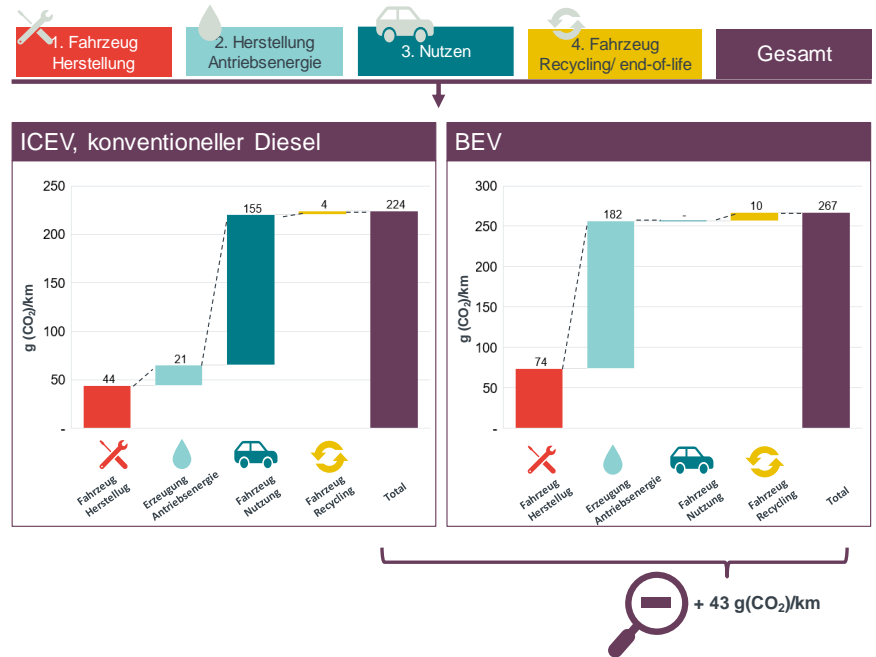
Hinweis: Fahrzeugtyp: Mittelklasse, Jahr der Anschaffung: 2020, Nutzungsdauer: 10 Jahre, Jahresleistung: 15.000 km, Kraftstoff: Diesel, Betriebsland: Deutschland (Referenzszenario), Herstellungsland Batterie: EU (Referenzszenario), Dynamisch

### Fallbeispiel SUV

Bei der SUV-Klasse ist, unter Beibehaltung aller anderen Parameter und Annahmen, das ICEV gegenüber dem BEV im Vorteil: Das BEV weist über den gesamten Lebenszyklus hinweg Mehremissionen von 43 g(CO<sub>2</sub>)/km gegenüber dem ICEV auf (**Abbildung 17** und **Abbildung 18**).

Eine Ursache dafür liegt bei der, im Vergleich zur Kompakt- oder Mittelklasse, größeren Batteriekapazität. Der herstellungsbedingte „CO<sub>2</sub>-Rucksack“ ist beim BEV damit bereits so groß, dass der Nachteil im Laufe der Nutzungsphase nicht mehr durch geringere CO<sub>2</sub>-Emissionen im Fahrzeugbetrieb ausgeglichen werden kann.

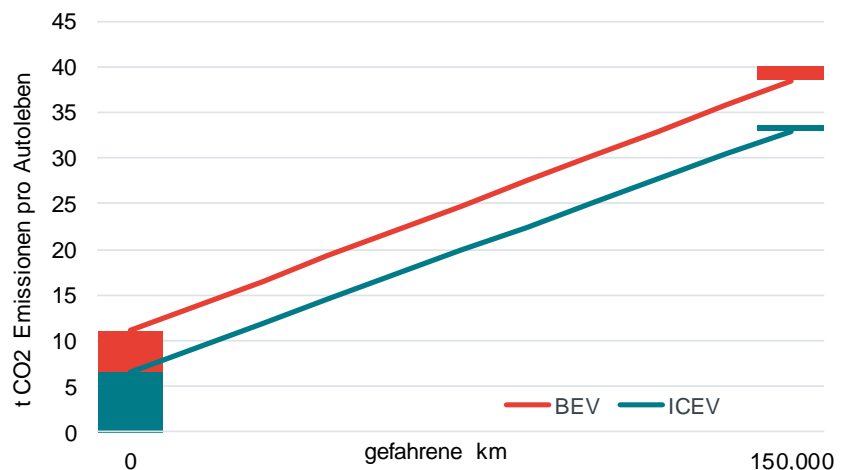
**Abbildung 17. Durch hohe Herstellungsemissionen und einen hohen Verbrauch emittiert ein SUV-BEV insgesamt mehr als ein vergleichbares ICEV**



Quelle: Frontier Economics

Hinweis: Fahrzeugtyp: SUV, Jahr der Anschaffung: 2020, Nutzungsdauer: 10 Jahre, Jahresleistung: 15.000 km, Kraftstoff: Diesel, Betriebsland: Deutschland (Referenzszenario), Herstellungsland Batterie: EU (Referenzszenario), Dynamisch

**Abbildung 18. Über den gesamten Lebenszyklus hinweg ist das ICEV dem BEV gegenüber im Vorteil**



Quelle: Frontier Economics

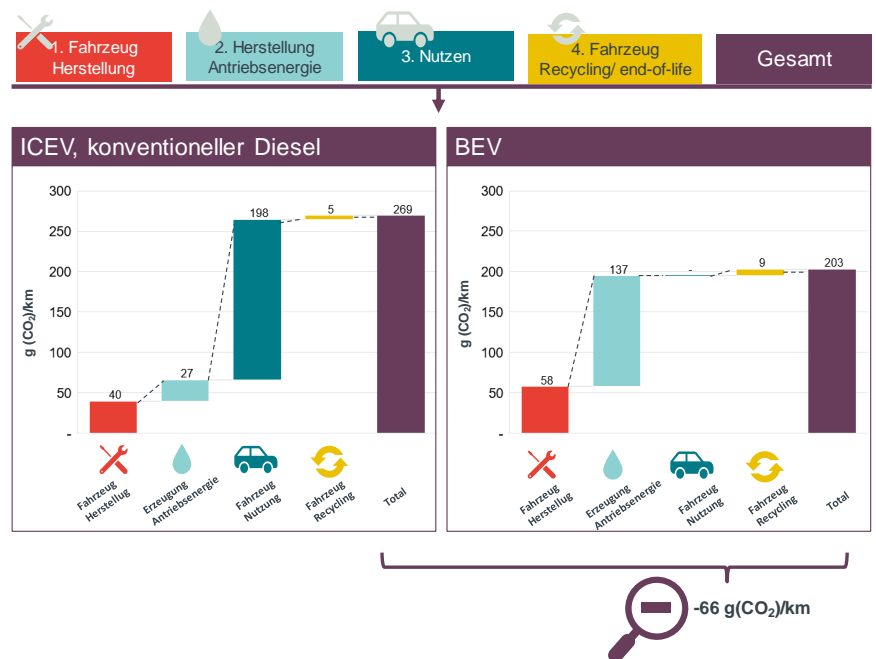
Hinweis: Fahrzeugtyp: SUV, Jahr der Anschaffung: 2020, Nutzungsdauer: 10 Jahre, Jahresleistung: 15.000 km, Kraftstoff: Diesel, Betriebsland: Deutschland (Referenzszenario), Herstellungsland Batterie: EU (Referenzszenario), Dynamisch

### Fallbeispiel Leichtes Nutzfahrzeug

Leichte Nutzfahrzeuge werden für eine Vielzahl von Verwendungszwecken eingesetzt. Sie dienen z.B. als Kundendienstfahrzeuge für Handwerksunternehmen in städtischen Bereichen (möglicherweise auf kürzeren Tagesstrecken) oder als leistungsstärkere Varianten mit z.B. höherem Zuladungspotenzial für größere Entfernungen. Diese Anwendungsvielfalt der LNF deutet sich auch bei heute von den Herstellern angekündigten Fahrzeugen mit batterieelektrischem Antrieb der LNF-Klasse an.

Insofern könnten für diese Untersuchungen verschiedene Batteriekapazitäten zugrunde gelegt werden. Am Beispiel eines LNF mit einer vergleichsweise kleinen Batteriekapazität zeigt sich, wiederum unter Beibehaltung aller anderen Parameter, erwartungsgemäß ein Vorteil für die batterieelektrische Variante, deren CO<sub>2</sub>-Emissionen bei 203 g(CO<sub>2</sub>)/km liegen, im Vergleich dazu bei ICEV bei 269 g(CO<sub>2</sub>)/km (**Abbildung 19**). In diesem Beispiel ist der „CO<sub>2</sub>-Rucksack“ der Batterieherstellung vergleichsweise klein (**Abbildung 20**). Der Break-Even-Punkt zugunsten des BEV liegt hier bereits bei einer Fahrleistung von ca. 38.000 km.

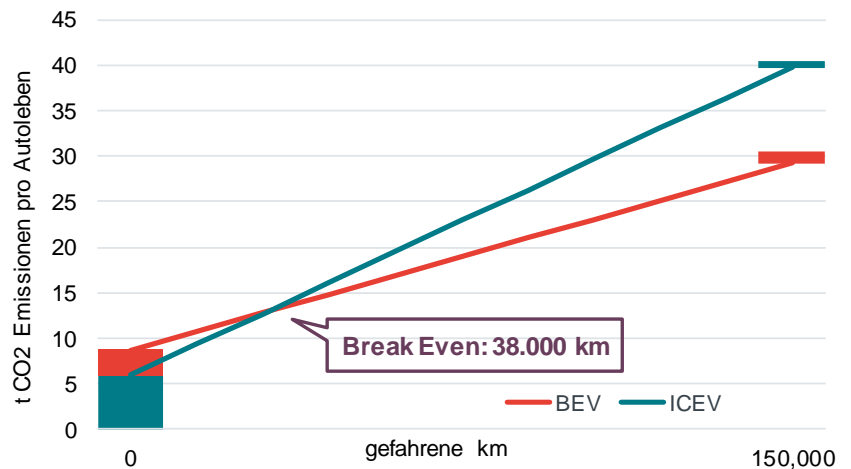
**Abbildung 19. Aufgrund des relativ hohen spezifischen Energiebedarfs ist das BEV im kleineren LNF-Leistungsbereich heute vorteilhaft**



Quelle: Frontier Economics

Hinweis: Fahrzeugtyp: Leichtes Nutzfahrzeug (37-kWh-Batterie), Jahr der Anschaffung: 2020, Nutzungsdauer: 10 Jahre, Jahresleistung: 15.000 km, Kraftstoff: Diesel, Betriebsland: Deutschland (Referenzszenario), Herstellungsland Batterie: EU (Referenzszenario), Dynamisch

**Abbildung 20. Für LNF mit kleiner Batteriekapazität wird der Break-Even-Punkt schon früh im Lebenszyklus erreicht**

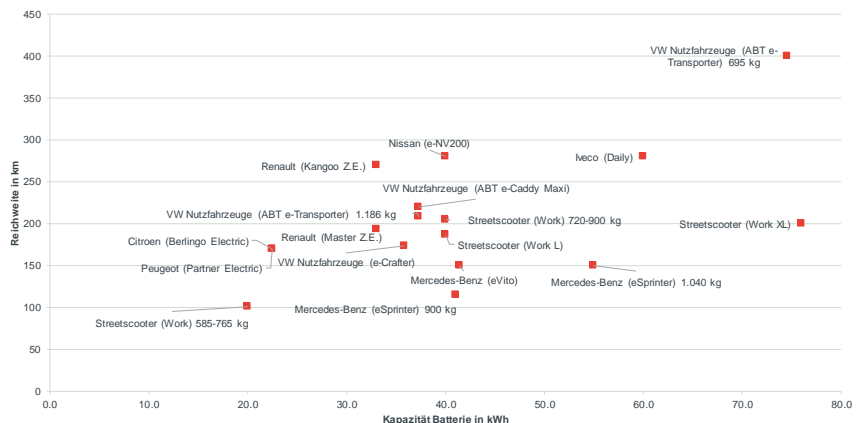


Quelle: Frontier Economics

Hinweis: Fahrzeugtyp: Leichtes Nutzfahrzeug (37-kWh-Batterie), Jahr der Anschaffung: 2020, Nutzungsdauer: 10 Jahre, Jahresleistung: 15.000 km, Kraftstoff: Diesel, Betriebsland: Deutschland (Referenzszenario), Herstellungsland Batterie: EU (Referenzszenario), Dynamisch

Die Klasse der LNF muss im Vergleich zu einer PKW-Klasse ein weitaus breiteres Gebrauchsspektrum abdecken. Vor allem bei größeren Reichweiten und hohem Zuladungspotenzial sind leistungsstärkere Fahrzeuge erforderlich. Inwieweit in diesem Segment BEV mit adäquat größeren Batteriekapazitäten und damit auch mit einem größeren Leergewicht sinnvoll sind (LNF sind auf max. 3,5t Gesamtgewicht begrenzt), ist fraglich. Flüssigkraftstoffe mit ihrer hohen Energiedichte haben deshalb bei hohen Zuladungsgewichten aus technischen Gründen für die Kundenanforderungen einen Vorteil (Abbildung 21).

**Abbildung 21. Leichte Nutzfahrzeuge werden mit verschiedenen Batteriegrößen angeboten**



Quelle: eurotransport.de (<https://www.eurotransport.de/artikel/grosse-marktuebersicht-elektro-transporter-16-transporter-modelle-mit-e-antrieb-10490177.html>), abgerufen am 26.08.2019)

Aber auch klimabilanziell sind BEV und ICEV bei höheren LNF-Leistungsbereichen wieder vergleichbar. Wird ein leistungsstärkeres Fahrzeug z.B. mit einer 75-kWh-Batterie (vgl. aktuelle Modellübersicht in **Abbildung 23**) betrachtet, liegen die CO<sub>2</sub>-Emissionen des BEV mit knapp 270 g(CO<sub>2</sub>)/km auf ungefähr gleichem Niveau wie die Emissionen des ICEV. Der Break-Even-Punkt wird nun erst nach 125.000 gefahrenen Kilometern erreicht. Analog zum Fallbeispiel SUV führt die größere Batterie auch hier zu höheren Herstellungsemissionen, die den Vorteil des BEV in der Nutzungsphase nahezu ausgleichen.<sup>17</sup>

### Fazit: Allgemeingültige Aussagen zur Vorteilhaftigkeit einzelner Antriebstechnologien sind nicht möglich – BEV und ICEV haben heute ihre jeweiligen Vorzüge

Insgesamt zeigen die Fallbeispiele, dass für die betrachteten unterschiedlichen Fahrzeugklassen bei ansonsten identisch gewählten Einflussparametern die CO<sub>2</sub>-Gesamtbilanzen bei BEV und ICEV zum Teil auf ähnlichem Niveau liegen, teilweise aber auch deutliche Unterschiede aufweisen – mit emissionsbezogenen Vor- und Nachteilen in beide Richtungen.

## 4.3 Viele Einflussfaktoren bestimmen im Einzelfall die CO<sub>2</sub>-Gesamtbilanz der Antriebstechnologien

Die ausgewählten Fallbeispiele zeigen, dass eine Reihe von Parametern mit unterschiedlichen Sensitivitäten auf die CO<sub>2</sub>-Gesamtbilanz bei ICEV und BEV wirken. Die wesentlichen Einflussfaktoren sind hierbei:

- **Fahrzeuggröße/Fahrzeugsegment:** Je größer und schwerer ein Fahrzeug ist oder beladen werden soll, desto mehr Leistung und Antriebsenergie wird benötigt, um es fortzubewegen. Danach richtet sich auch die Dimensionierung der Batteriekapazität und der Verbrauch an Endenergie.
- **Reichweite:** Je weiter die Distanz ist, die ein Fahrzeug zurücklegen soll, bis es wieder betankt bzw. aufgeladen wird, desto größer ist die benötigte Batterie. Während bei einem Kompaktfahrzeug ein mit flüssigem Kraftstoff, wie z.B. Diesel, aufgefüllter Tank ausreichend Energie besitzt, um mehr als 800 km ohne Nachtankvorgang zurückzulegen, ist diese Distanz beim BEV heute praktisch nicht erreichbar. Grundsätzlich müssen Fahrzeughersteller bei einem BEV genauer abwägen, wie viel Kapazität der Batterie nötig ist. Auf der einen Seite ist mehr Kapazität wünschenswert, da dadurch eine höhere Reichweite bzw. der

<sup>17</sup> Der Nutzungsphasenvorteil des BEV wird hier neben den höheren Herstellungsemissionen durch den höheren Verbrauch von leichten Nutzfahrzeugen, die mit der größeren Batterie gleichzeitig auch schwerer beladen sind, reduziert..

---



Eine ganze Reihe von Parametern beeinflussen die CO<sub>2</sub>-Gesamtbilanz

---

Transport von mehr Gewicht möglich ist. Auf der anderen Seite ist der Energiebedarf für die Herstellung einer Kilowattstunde Batteriekapazität hoch und steigt praktisch mit jeder weiteren kWh an Kapazität an.

Zudem sind Batterien mit höherer Kapazität auch deutlich größer und vor allem schwerer, so dass es räumliche Limitationen für die Kapazität der Batterie gibt. In einem typischen BEV-Kompaktklassewagen werden aus Platz-, Gewichts- und Kostengründen daher meist Batterien mit einer Kapazität von 40 kWh verwendet, mit denen eine Reichweite von etwa 200 km zurückgelegt werden kann. Die Produktion einer 40-kWh-Batterie verursacht deutlich weniger CO<sub>2</sub>-Emissionen als die Herstellung einer größeren Batterie mit z.B. 100 kWh Ladekapazität (verbaut z.B. im Tesla Model S).

**Abbildung 22. Tendenzielle ICEV- und BEV-Vorteile in den Anwendungen mit ausgewählten Vergleichskategorien**

| BEV  vorteilhaft bei... | ICEV  vorteilhaft bei... | ...benötigter Eigenschaft          |
|--|---|------------------------------------|
| geringerer   | höherer   | Fahrzeug<br>- gröÙe,<br>- beladung |
| geringerer   | höherer   | Reichweite                         |
| höherer  | geringerer  | Lebens-<br>fahrleistung            |

Quelle: Frontier Economics

- **Lebensfahrleistung:** Wenn ein Fahrzeug nicht mit 100% erneuerbarer Energie angetrieben wird, fallen direkt oder indirekt mit jedem gefahrenen Kilometer CO<sub>2</sub>-Emissionen an.
- **Betriebsland:** Die CO<sub>2</sub>-Intensität jeder Kilowattstunde erzeugten Stroms hängt vom Strommix des Betriebslandes ab. Für Deutschland wird zum Beispiel im Jahr 2020 eine CO<sub>2</sub>-Intensität (inkl. Emissionen aus dem Anlagenausbau) von etwa 467 g(CO<sub>2</sub>)/kWh exklusive und 516 g(CO<sub>2</sub>)/kWh inklusive EE-Anlagenausbau erwartet.
- **Herstellungsland:** Vor allem für die energieintensive Herstellung der Batterie ist es relevant, welchen Strommix das Herstellungsland hat. Der Strommix Chinas, Herkunftsland der aktuell am häufigsten in Fahrzeugen verbauten Batterien, weist eine deutlich höhere CO<sub>2</sub>-Intensität (743 g(CO<sub>2</sub>)/kWh in 2017) als der Japans (581 g(CO<sub>2</sub>)/kWh in 2017), gefolgt von dem der USA (480 g(CO<sub>2</sub>)/kWh in 2017) und dem der EU (378 g(CO<sub>2</sub>)/kWh in 2017) auf.
- **Nutzungszeitraum:** Der Nutzungszeitraum ist dann relevant, wenn Veränderungen über die Zeit, z.B. bezüglich des Fahrzeugverbrauchs von Neuwagen oder ein Anstieg des erneuerbaren Anteils am Strom- bzw. Energiemix, berücksichtigt werden. So nehmen wir in unseren Rechnungen bei den BEV an, dass der Strommix für den Ladestrom im Laufe des Lebens des Fahrzeugs „grüner“ wird („dynamische“ Betrachtung; zu beachten: bei den fossilen Kraftstoffen nehmen wir bis hierhin noch keinen – z.B. durch den verstärkten Einsatz von Biokraftstoffen oder die Beimischung von grünen, synthetischen Kraftstoffen – grüner werdenden Energiemix an!). Andere Gesamtbilanzen ergeben sich beispielsweise, wenn für die Lebensdauer des Fahrzeugs ein statischer Strommix zugrunde gelegt wird. Das wäre der Fall, wenn angenommen würde, dass der Anteil der Erneuerbaren Energien an der Stromerzeugung im Betriebsland (hier:



Deutschland) während der Nutzungsdauer des Fahrzeugs stabil auf heutigem Niveau bliebe. Diese Sensitivität kann im Berechnungstool ausgewählt werden.

Die Vorzüge der einzelnen Technologien hinsichtlich der Anwendungen (**Abbildung 22**) und ihrer CO<sub>2</sub>-Gesamtbilanz resultieren aus den Emissionen während der einzelnen Lebenszyklusabschnitte:

- **Inbetriebnahme:** Das BEV startet mit einem größeren „CO<sub>2</sub>-Rucksack“ in den Betrieb als das ICEV, da insbesondere bei der Herstellung der Batterien heute und in absehbarer Zukunft relevante CO<sub>2</sub>-Emissionen unabhängig vom Herstellort anfallen.
- **Während des Betriebs des Fahrzeugs:** Die Herstellung des Ladestroms für den Betrieb von BEV ist heute und in absehbarer Zukunft fast überall auf der Welt mit CO<sub>2</sub>-Emissionen verbunden. In vielen Fällen sind die Ladestrom-Emissionen in der Gesamtbilanz niedriger als die Emissionen, die durch die Verwendung rein fossiler Kraftstoffe im ICEV frei werden. Bei hoher Fahrleistung kann daher in diesen Fällen das BEV die höheren Herstellungsemissionen während der Nutzungsphase gegenüber dem ICEV kompensieren, so dass es zu einem Break-Even-Punkt kommt. Aber selbst bei geringeren CO<sub>2</sub>-Emissionen je zurückgelegtem Kilometer kommt es nicht zwangsläufig zu einem Break-Even-Punkt: Sobald nämlich die Batterie im BEV ausgetauscht werden muss, fallen erneut Emissionen für die Batterieherstellung an, die dann wiederum über eine noch weitere Fahrleistung kompensiert werden müssen.
- **Entsorgung/Recycling:** Der Aufwand für die Entsorgung der Batterien ist abhängig von der Größe der Batterie. Bereits bei der Entsorgung eines BEV mit einer 40-kWh-Batterie fallen mehr Emissionen an als beim vergleichbaren ICEV, allerdings aus heutiger Sicht auf einem im Vergleich zu den anderen Lebenszyklusabschnitten eher niedrigeren Niveau.

Ein heute nicht zu vernachlässigendes Kriterium aus Verbrauchersicht ist die Reichweite der Fahrzeuge. Im folgenden Exkurs wird deshalb ergänzend eine rechnerische Vergleichsanalyse für die Kompaktklasse durchgeführt, bei der hypothetisch eine Batterie so dimensioniert wird, dass eine identische Reichweite der Fahrzeuge beider Antriebsarten erreicht werden kann.

## EXKURS: VERGLEICH VON FAHRZEUGEN MIT IDENTISCHER REICHWEITE

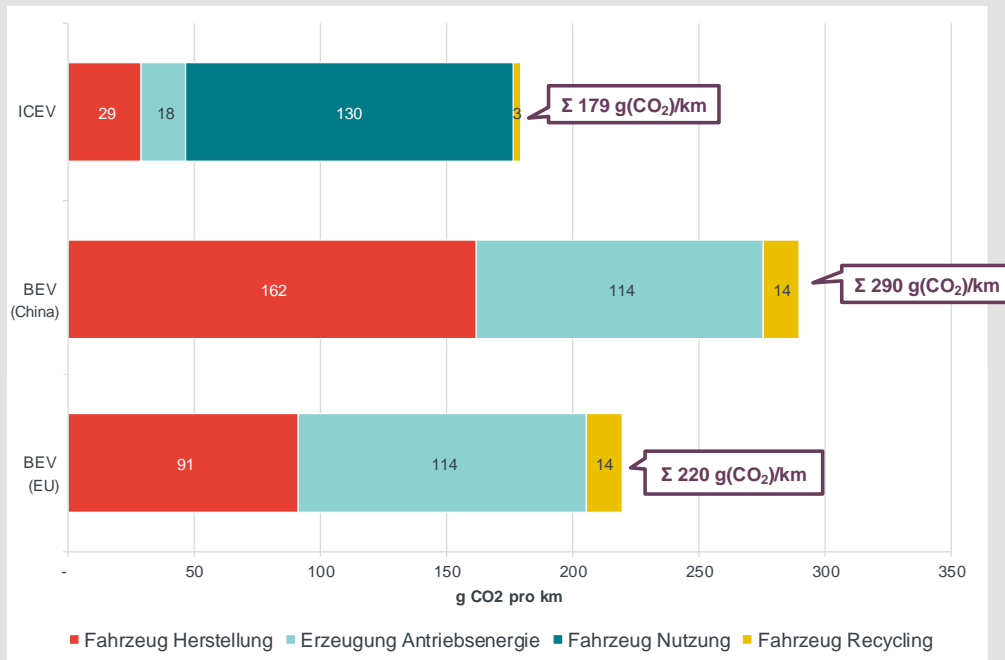
Eine der größten Einschränkungen batterieelektrischer Fahrzeuge ist aktuell die Reichweite. Mit Kompaktklassenfahrzeugen wie beispielsweise dem VW Golf, betrieben mit einem konventionellen Verbrennungsmotor, lassen sich bei einer Tankgröße von 40 l und einem Verbrauch von 5 l/100 km problemlos Strecken von 800 km mit einer Tankfüllung zurücklegen.

Diese Reichweiten werden von den aktuell verfügbaren batterieelektrischen Fahrzeugen nicht erreicht. So erreicht z.B. ein Nissan Leaf, der ebenfalls der Kompaktklasse zuzurechnen ist, mit einer Batteriekapazität von 40 kWh und einem Verbrauch von 21 kWh/100 km nicht einmal ein Viertel dieser Distanz.

Würde man (technische Einschränkungen außer Acht lassend) die Kapazität der Batterie entsprechend der erforderlichen Reichweite hochskalieren, wäre im VW Golf-Beispiel für eine Reichweite von 800 km eine Batterie mit einer Kapazität von etwa 170 kWh erforderlich. Abweichend zu den sonstigen Berechnungen nehmen wir hier vereinfacht die vollständige Auf- sowie Entladung der Batterie an.

Neben einer Vielzahl von praktischen Limitationen hätte dies auch negative Auswirkungen in Bezug auf die CO<sub>2</sub>-Emissionen. Mit dem aktuellen Strommix würde allein die Herstellung einer solchen Batterie in China fast so viel CO<sub>2</sub> verursachen wie ein vergleichbares Fahrzeug mit Verbrennungsmotor während des gesamten Lebenszyklus (**Abbildung 23**). Auch bei vermeintlich „grünerer“ Herstellung in der EU sind die Lebenszyklusemissionen noch mehr als 35% höher als die des ICEV.

**Abbildung 23. Bei gleicher Reichweite würden allein für die Batterieherstellung eines BEV-Kompaktwagens fast so viele Emissionen verursacht wie im ganzen Leben eines ICEV**



Quelle: Frontier Economics

Hinweis: Fahrzeugtyp: Kompaktklasse, Jahr der Anschaffung: 2020, Nutzungsdauer: 10 Jahre, Jahresleistung: 15.000 km, Kraftstoff: Diesel, Betriebsland: Deutschland (Referenzszenario), Herstellungsland Batterie: EU (Referenzszenario), alternativ China, Dynamisch

## 5. ZUKÜNFTIG GIBT ES MIT ICEV UND BEV MINDESTENS ZWEI TECHNOLOGIEOPTIONEN FÜR EINE NACHHALTIGE CO<sub>2</sub>-MINDERUNG

---

Bis hierhin haben wir weitgehend auf die Situation bezüglich CO<sub>2</sub>-Emissionen der betrachteten Fahrzeuge heute bzw. in der näheren Zukunft fokussiert. So haben wir im vorhergehenden Abschnitt z.B. bei sämtlichen Analysen bei ICEV zunächst fossile, konventionelle Kraftstoffe, wie sie heute eingesetzt werden, zugrunde gelegt.

Neben der aktuellen Klimabilanz ist allerdings auch das zukünftige Potenzial zur weiteren CO<sub>2</sub>-Vermeidung ein wichtiger Aspekt bei der Bewertung der verschiedenen Antriebstechnologien auf Zukunftsfähigkeit. Im Folgenden gehen wir auf die unterschiedlichen CO<sub>2</sub>-Vermeidungspotenziale von ICEV und BEV ein und verdeutlichen die Bandbreite an zukünftigen technologischen Lösungen.

### 5.1 Zukünftig sind bei ICEV CO<sub>2</sub>-Minderungen durch die Beimischung von E-Fuels möglich

In Ergänzung zu den vorangegangenen Analysen mit Fokus auf die aktuelle Klimawirksamkeit der Fahrzeuge wird nachfolgend herausgearbeitet, welches Potenzial sowohl BEV als auch ICEV perspektivisch für die Klimazielerreichung mitbringen. Dabei spielt nicht nur die zunehmend auf EE basierende Herstellung des Fahrzeugs, sondern auch die Bereitstellung von auf EE basierender Antriebsenergie eine entscheidende Rolle:

BEV werden ihren CO<sub>2</sub>-Abdruck zukünftig vermindern können, wenn für die Batterieherstellung Strom aus Erneuerbaren Energien eingesetzt wird und die CO<sub>2</sub>-Intensität des Ladestroms abnimmt.

Aber auch der CO<sub>2</sub>-Abdruck von ICEV kann deutlich reduziert werden, indem statt der in Kap. 4 noch zugrunde gelegten konventionellen Kraftstoffe (mit geringfügiger Biokraftbeimischung) zukünftig zunehmend synthetische Kraftstoffe, die aus Erneuerbaren Energien gewonnen werden, zum Einsatz kommen (sog. E-Fuels). Von der Herstellung bis zur Verwendung erreichen mit EE-Strom hergestellte E-Fuels in der Gesamtbilanz THG-Neutralität: Zwar fallen in der Nutzungsphase wie auch bei konventionellen Kraftstoffen CO<sub>2</sub>-Emissionen an, das CO<sub>2</sub> wird aber bei der Herstellung des E-Fuels der Umwelt entnommen. Die Klimabilanz ist somit ausgeglichen.

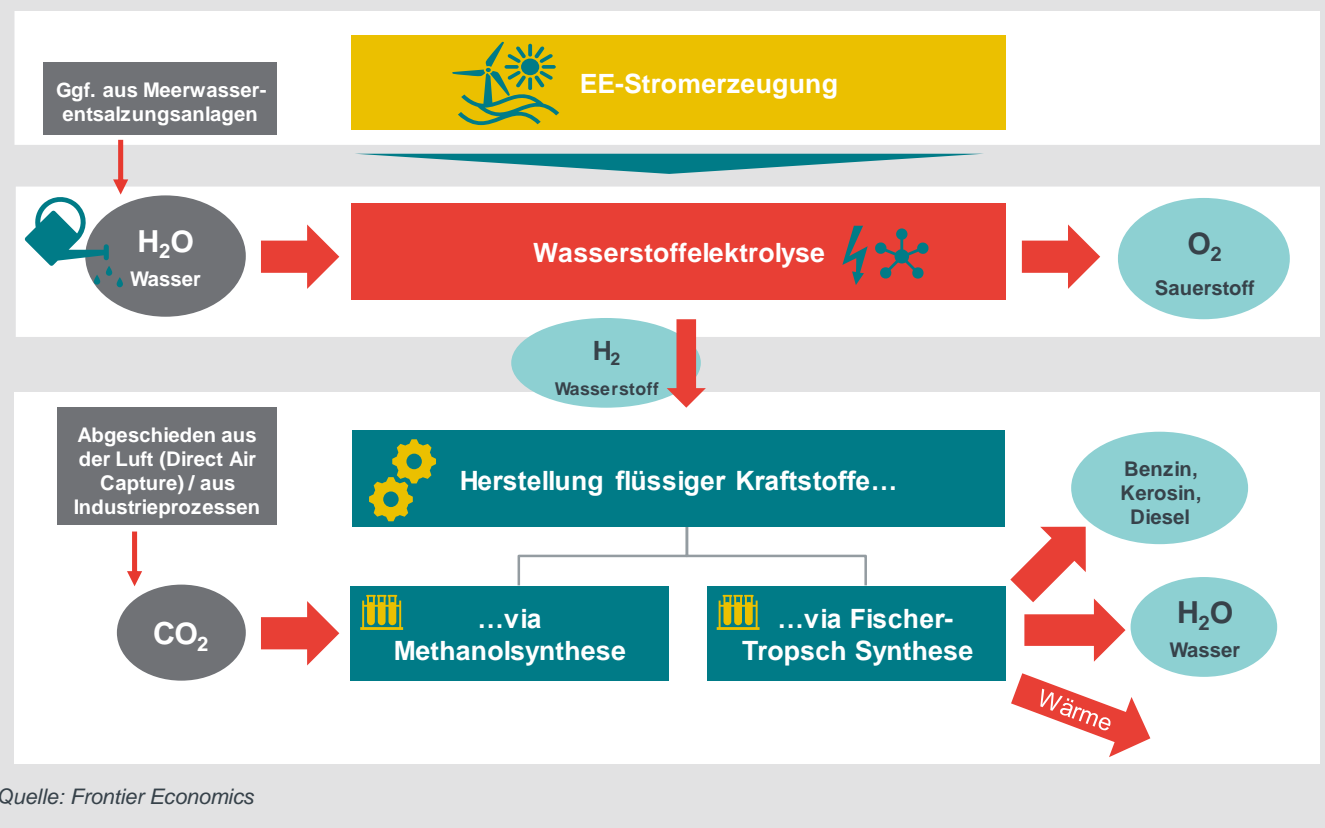
## EXKURS: HERSTELLUNG VON E-FUELS AUS ERNEUERBAREN ENERGIEN

Die Herstellung von E-Fuels (**Abbildung 24**) basiert auf aus Erneuerbaren Energien hergestelltem Strom und zwei Umwandlungsschritten:

- Zunächst wird aus Erneuerbaren Energien Strom erzeugt;
- via Elektrolyse wird unter Einsatz des Stroms Wasser in Wasserstoff (und Sauerstoff) umgewandelt (in trockenen Regionen kann das benötigte Wasser aus Meerwasserentsalzungsanlagen gewonnen werden); und
- in einem weiteren Schritt wird via Methanol- beziehungsweise Fischer-Tropsch-Synthese aus dem Wasserstoff und unter Einsatz von Kohlenstoff (CO<sub>2</sub>) synthetischer Flüssigkraftstoff erzeugt.

Um Klimaneutralität zu erreichen, muss das benötigte CO<sub>2</sub> aus einem geschlossenen Kreislauf stammen. Das bedeutet, dass das CO<sub>2</sub> z.B. aus der Luft, Biomasse oder aus Emissionsquellen gewonnen werden muss, die ohnehin vorhanden sind (z.B. in konzentrierter Form aus bestehenden Industrieprozessen).

**Abbildung 24. Herstellung von E-Fuels**

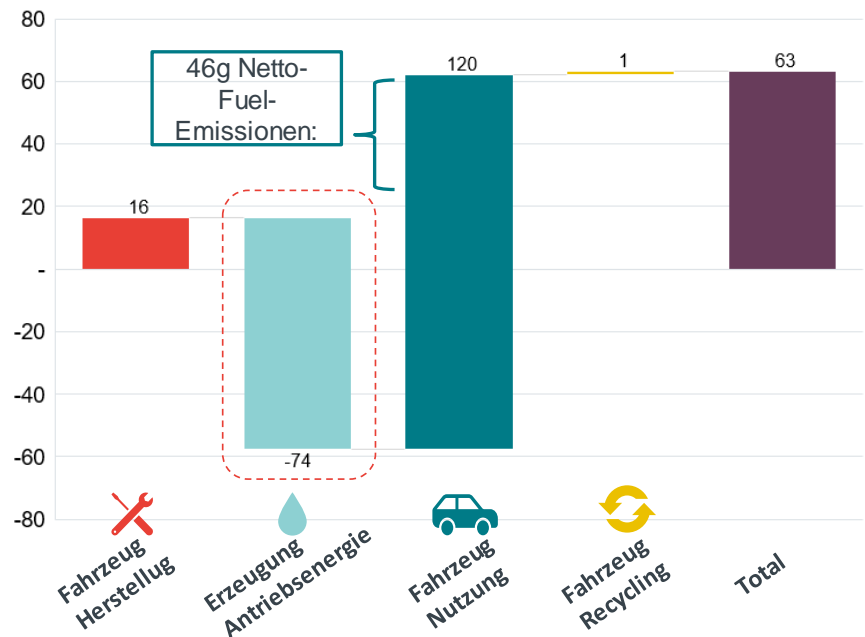


In dem folgenden Fallbeispiel (**Abbildung 25**) wird während der Nutzungsdauer des Fahrzeugs (Annahme hier: Jahre 2040 - 2050) eine Mischung aus fossilem und synthetischem Kraftstoff eingesetzt. Konkret betrachten wir eine E-Fuel-Beimischung von 70%<sup>18</sup> zu fossilem Diesel. Im Ergebnis zeigt sich folgendes Bild:

<sup>18</sup> Bei dem Beimischungsanteil von 70% im Jahr 2040 stützen wir uns auf den Mittelwert der E-Fuel-Hochlaufkurven (S. 33) aus der Studie von Prognos AG, Fraunhofer-Instituts

- Die Emissionen während der Fahrzeugnutzung (Tank-to-Wheel) betragen beim ICEV +120 g(CO<sub>2</sub>)/km.
- Das bei der Nutzung emittierte CO<sub>2</sub> wird vorher bei der Herstellung des E-Fuels (Well-to-Tank) z.B. der Umwelt oder einer biogenen Quelle entnommen. Dadurch ergeben sich die in **Abbildung 25** gekennzeichneten Negativemissionen (im Folgenden auch CO<sub>2</sub>-Gutschrift) von -74 g(CO<sub>2</sub>)/km.
- Somit verbleiben in diesem Beispiel bei einer 70%igen E-Fuel-Beimengung für die Antriebsenergie aggregiert über die Herstellung und Nutzung (also Well-to-Wheel) Emissionen von 46 g(CO<sub>2</sub>)/km.
- Die CO<sub>2</sub>-Gesamtbilanz gemäß der LCA liegt für dieses ICEV somit bei ca. 63 g(CO<sub>2</sub>)/km.

**Abbildung 25. Durch die Beimischung von E-Fuels entsteht eine CO<sub>2</sub>-Gutschrift in der Erzeugung der Antriebsenergie**



Quelle: Frontier Economics

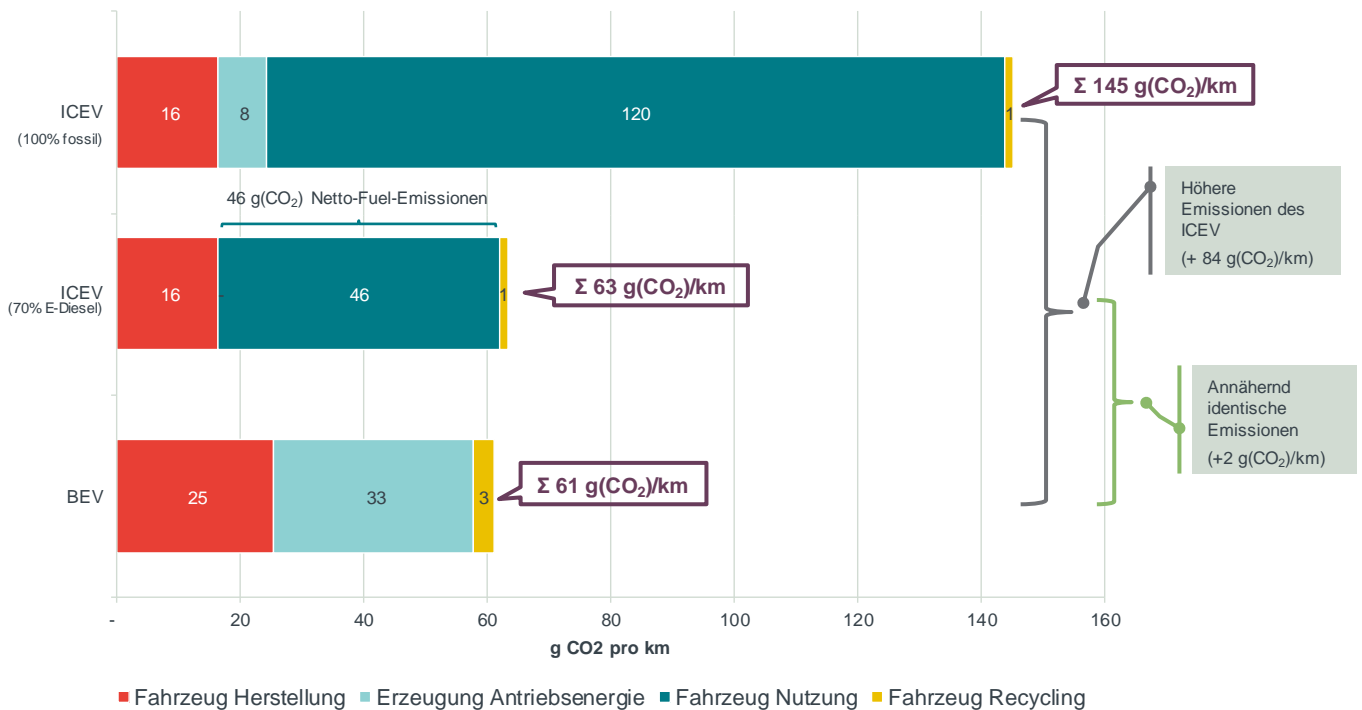
Hinweis: Fahrzeugtyp: Mittelklasse, Jahr der Anschaffung: 2040, Nutzungsdauer: 10 Jahre, Jahresleistung: 15.000 km, Kraftstoff: Fuel Mix (Diesel aus EE: 70%), Betriebsland: Deutschland (Referenzszenario), Herstellungsland Batterie: EU (Referenzszenario), Dynamisch

## 5.2 Durch Beimischung von E-Fuels bleibt die CO<sub>2</sub>-Gesamtbilanz von ICEV und BEV auch zukünftig auf Augenhöhe

Der nachstehende Vergleich zeigt beispielhaft, dass ICEV und BEV – bei den zugrundeliegenden Annahmen für die Zunahme von erneuerbarem Ladestrom des Betriebslandes (hier: Deutschland) und die Beimischung von E-Fuels (hier 70%) – zukünftig auf einem ähnlichen Niveau hinsichtlich der km-bezogenen CO<sub>2</sub>-Gesamtbilanz liegen können (**Abbildung 26**). Es zeigt sich, dass

- die Gesamtemissionen des ICEV durch eine Beimischung von 70% E-Fuels auf 63 g(CO<sub>2</sub>)/km reduziert werden (im Vergleich dazu würde ein ICEV mit 100% konventionellem Diesel betrieben bei ca. 145 g(CO<sub>2</sub>)/km liegen);
- die CO<sub>2</sub>-Emissionen des BEV, für das der Ladestrom durchschnittlich von 2040 bis 2050 einen EE-Anteil von 82% aufweist, in einer Größenordnung von 61 g(CO<sub>2</sub>)/km liegen; und
- somit ein ICEV durch die E-Fuel-Beimischung in diesem Szenario in etwa die gleiche Menge an CO<sub>2</sub>-Emissionen wie ein BEV verursacht.

**Abbildung 26. CO<sub>2</sub>-Reduktionspotenzial durch den zunehmenden Einsatz von erneuerbarem Ladestrom beim BEV und durch Beimischung von E-Fuels beim ICEV**

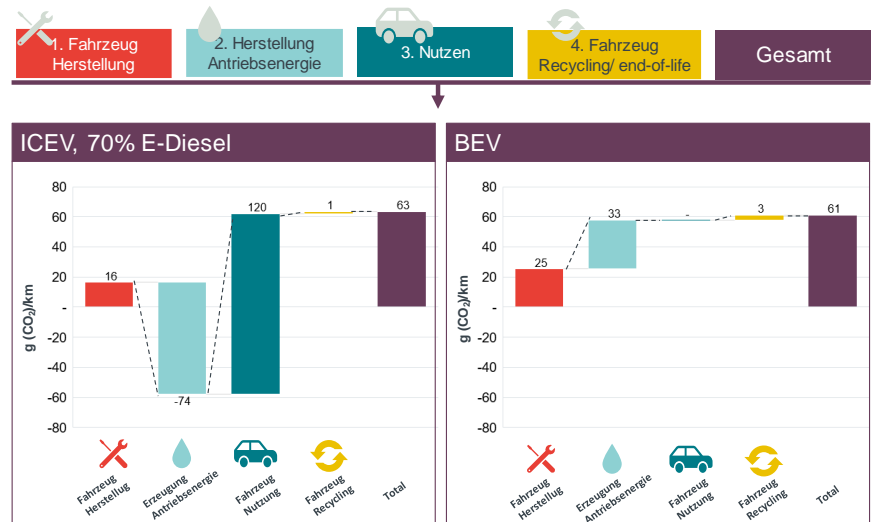


Quelle: Frontier Economics

Hinweis: Fahrzeugtyp: Mittelklasse, Jahr der Anschaffung: 2040, Nutzungsdauer: 10 Jahre, Jahresleistung: 15.000 km, Kraftstoff: Diesel mit 70% E-Diesel Beimischung, Betriebsland: Deutschland (Referenzszenario), Herstellungsland Batterie: EU (Referenzszenario), Dynamisch

Grund für diesen Befund ist die „CO<sub>2</sub>-Gutschrift“ für die klimaneutrale Herstellung des synthetischen Kraftstoffs aus Erneuerbaren Energien (**Abbildung 27**).

**Abbildung 27. Durch die CO<sub>2</sub>-Gutschrift aus der Kraftstoffherstellung sind die Gesamtemissionen von ICEV und BEV auf einem ähnlichen Niveau**



Quelle: Frontier Economics

Hinweis: Fahrzeugtyp: Mittelklasse, Jahr der Anschaffung: 2040, Nutzungsdauer: 10 Jahre, Jahresleistung: 15.000 km, Kraftstoff: Diesel mit 70% E-Diesel Beimischung, Betriebsland: Deutschland (Referenzszenario), Herstellungsland Batterie: EU (Referenzszenario), Dynamisch

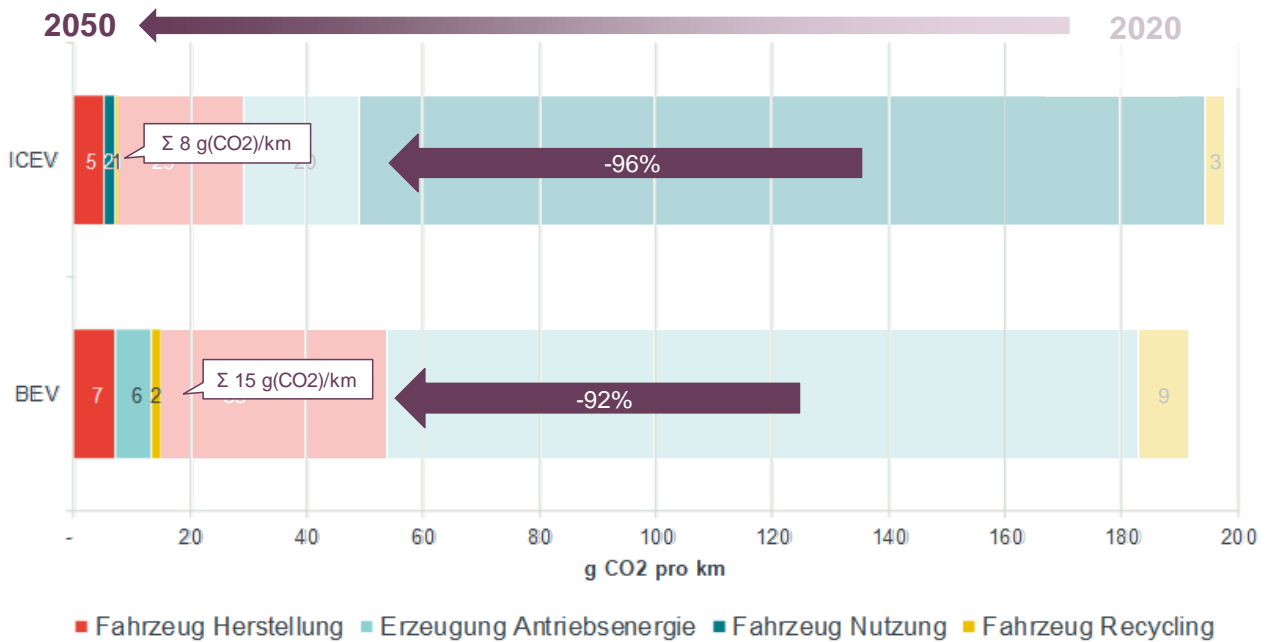
## 5.3 Mit steigenden EE-Anteilen stehen mit ICEV und BEV zielführende Technologieoptionen zur Verfügung



Für die THG-Neutralität stehen mit ICEV und BEV mehrere zielführende Technologien zur Verfügung

Bis zum Jahr 2050 und danach bieten beide gezeigten Technologieoptionen das erforderliche Potential zur notwendigen Einsparung von CO<sub>2</sub>-Emissionen bis hin zur THG-Neutralität. Das in **Abbildung 28** dargestellte Szenario zeigt die CO<sub>2</sub>-Emissionen der Fahrzeuge bei einem Strommix mit einem Anteil von nahezu 100% Erneuerbaren Energien sowie einer E-Fuel-Beimischung von 100%. Im Vergleich zum Jahr 2020 verringern sich die Emissionen bei ICEV und BEV um 96% beziehungsweise um 92%. Damit würden gesamtbilanziell die CO<sub>2</sub>-Emissionen je nach Technologie nur noch zwischen 8 und 15 g(CO<sub>2</sub>)/km liegen. Diese geringen Restemissionen werden in noch fernerer Zukunft gänzlich verschwinden, wenn auch für den EE-Anlagenbau keine Emissionen mehr anfallen und ein vollständiges Recycling und die komplette Vermeidung aller materialbedingten Emissionen möglich sind.

Abbildung 28. Um 2050 könnten alle betrachteten Antriebstechnologien nahezu Klimaneutralität erreichen



Quelle: Frontier Economics

Hinweis: Das im Hintergrund abgebildete Szenario entspricht dem in Kapitel 4.2 gezeigten Szenario: Fahrzeugtyp: Mittelklasse, Jahr der Anschaffung: 2020, Nutzungsdauer: 10 Jahre, Jahresleistung: 15.000 km, Lebensleistung 150.000 km, Kraftstoff: Diesel, Betriebsland: Deutschland (Referenzszenario), Herstellungsland Batterie: EU (Referenzszenario), Dynamisch. Dem vordergründig gezeigten Szenario liegen folgende abweichende Parameter zu Grunde: Für das Jahr der Anschaffung haben wir 2049 - das vom Berechnungstool letztmöglich darstellbare Jahr - gewählt, die Lebensleistung von 150.000 km ist dieselbe wie im Ausgangsszenario, wird jedoch vollständig mit den Eingangsparametern des Jahres 2050 zurückgelegt, Kraftstoff: Fuel Mix (100% E-Diesel), Betriebsland: Weiterhin Deutschland (allerdings unter Anwendung des optimistischen Szenarios), Herstellungsland Batterie: Weiterhin EU (allerdings unter Anwendung des optimistischen Szenarios).

Die aufgeführten Fallbeispiele zeigen, dass im Hinblick auf die zukünftige Klimaneutralität nicht eine, sondern mehrere Antriebstechnologieoptionen zur Verfügung stehen. Diese Vielfalt bietet zudem das Potenzial, auch zukünftig den diversen Anforderungen an Mobilität gerecht zu werden, ohne Klimaschutzziele oder Anwendungssicherheit zu gefährden, wie z.B.:



Technologiemix im Verkehrssektor ist berechtigte und notwendige Voraussetzung für das Erreichen der Klimaziele

- Die **BEV-Technologie**, auf Basis zunehmender Anteile erneuerbar erzeugten Stroms, ist vorteilhaft für leichtere PKW auf kürzeren Strecken in Regionen mit leicht ausbaubarer Ladeinfrastruktur (zum Beispiel auch für LNF, die auf kurzen Distanzen genutzt werden).
- Die **ICEV-Technologie**, mit zunehmendem Einsatz von E-Fuels, bietet sich generell bei PKW mit höherem Leistungsbedarf an (etwa ab Mittelklasse und SUV).

Zudem bieten sich synthetische Kraftstoffe als mittelfristige Maßnahme an, da sie im Fahrzeugbestand ohne technische Anpassungen angewandt werden können. Handling und Nutzung von E-Fuels sind relativ einfach. Ihr Einsatz wird bei bestimmten Anwendungen und Verkehrsträgern, die über die in dieser Studie untersuchten



Fahrzeugklassen hinausgehen (wie zum Beispiel Luftverkehr) aus heutiger Sicht nahezu unverzichtbar sein.

## 6. KLIMAPOLITISCH UND REGULATORISCH IST EINE ÖFFNUNG IN RICHTUNG TECHNOLOGIEOFFENHEIT ERFORDERLICH

---

Die in dieser Studie untersuchten Klimabilanzen von Antriebstechnologien im Bereich der PKW und LNF haben gezeigt, dass ein Technologiemix einer von vornherein limitierten Technologieauswahl vorzuziehen ist. Um CO<sub>2</sub>-Emissionen zukünftig nachhaltig zu mindern, ist es sinnvoll und empfehlenswert, den Regulierungsrahmen für den Verkehrssektor so zu gestalten, dass nicht nur batterieelektrische Antriebe, sondern auch Antriebe basierend auf E-Fuels (ICEV) gleichberechtigt vorangetrieben werden. Schlussfolgernd daraus werden am Ende dieses Kapitels konkretere Handlungsempfehlungen an die Politik abgeleitet.

### 6.1 E-Fuels sind neben Elektromobilität aus klimapolitischen Gründen gleichberechtigt voranzutreiben

In der heutigen politischen Ausgangslage kommen regulatorische Rahmenbedingungen zum Tragen, die hinsichtlich der Minderung von CO<sub>2</sub>-Emissionen im Straßenverkehr ausschließlich auf die Nutzung des Fahrzeugs beschränkt sind. Aus dieser Perspektive sind BEV aktuell im Vorteil, da erneuerbare Kraftstoffe, die als E-Fuels in ICEV verwendet werden, in keiner Form angerechnet werden. So finden sie beispielsweise keine Berücksichtigung in der EU-CO<sub>2</sub>-Flottenrichtlinie für PKW und LNF.

Wie die bisherige Analyse gezeigt hat, stellen E-Fuels für die Erreichung der ambitionierten Klimaziele eine wichtige technologische Lösungsoption dar. So zeigen sich bezüglich der CO<sub>2</sub>-Emissionen über den gesamten Lebenszyklus für die verschiedenen Fahrzeugklassen und Technologien folgende Ergebnisse:

- Unter Berücksichtigung der aktuellen und kurzfristig zu erwartenden Situation in den Strom- und Energiemärkten (bis etwa zum Jahr 2030) schneiden ICEV (mit den heutigen konventionellen Kraftstoffen) und BEV (mit dem heutigen und bis 2030 zu erwartenden EE-Ausbau im Strommix) hinsichtlich der CO<sub>2</sub>-Emissionen insgesamt auf einem ähnlichen Niveau ab.
- Dieses Ergebnis kann jedoch je nach Einzelfall variieren. So werden z.B. tendenziell ICEV bei Antrieben mit höherer Leistung



### Die EU-CO<sub>2</sub>-Flottenrichtlinie für PKW und LNF

---

ist für zielkonforme Technologien zu öffnen

---

(etwa ab PKW-Mittelklasse) vorteilhaft, BEV sind dagegen bei Antrieben mit geringerer Leistung (Kompakt- bis Mittelklasse je nach Parameterset) emissionsärmer.

- Einen signifikanten Einfluss auf die CO<sub>2</sub>-Gesamtbilanz des BEV üben z.B. der Herstellort der Batterie und auch die weitere Entwicklung der EE-Anteile im Strommix, der im Betriebsland zum Laden der Batterien zur Verfügung steht, aus.
- Zum Erreichen der Klimaziele in Richtung THG-Neutralität stehen beide Technologien als Lösungsoption zur Verfügung: ICEV mit zunehmendem Einsatz von E-Fuels und BEV mit zunehmend erneuerbar hergestelltem Strom, eingesetzt sowohl beim Laden des Fahrzeugs, als auch für die Batterieherstellung.

Um das Potenzial dieser Technologien für die Defossilisierung des Straßenverkehrs erschließen zu können, müssen diese gleichberechtigt in der Politik und in den regulatorischen Rahmenbedingungen anerkannt werden. Ein zielkonformer Technologiemix ist eine wichtige Voraussetzung für den erfolgreichen Transformationsprozess hin zu einem THG-neutralen Verkehrssektor.

## 6.2 Für den gleichrangigen Technologiemi- x sprechen auch Kosten und Kunden- bedürfnisse



### Verbraucher

sollten CO<sub>2</sub>-einspa-  
rende Technologien  
selbst wählen können,

um den sehr unterschiedli-  
chen Mobilitätsbedürfnis-  
sen Rechnung tragen zu  
können

Die CO<sub>2</sub>-LCA hat gezeigt, dass mehrere Technologien in der Lage sind, langfristig die Defossilisierung des Straßenverkehrs zu erreichen. Für die Öffnung und Anpassung der relevanten Regularien sprechen weitere wichtige Sachverhalte:

#### Technologiemi- x sichert vielfältige Ansprüche in der Straßen- mobilität

Individuelle Mobilität hat einen hohen Wert für die Volkswirtschaft: Deshalb gilt es vor allem im Bereich der PKW, auch in der Zukunft den vielfältigen Anforderungen an Mobilität gerecht zu werden. So werden weiterhin verschiedene Fahrzeugsegmente und Fahrprofile (Nutzung auf dem Land oder in der Stadt, für kurze oder lange Strecken, etc.) abgedeckt werden müssen. Auf einen breiten Technologiemi-  
x zurückgreifen zu können, bietet somit die Möglichkeit, CO<sub>2</sub>-Emissionen zu vermindern und dabei dennoch individuellen Anforderungen verschiedener Nutzer gerecht zu werden. So können auch Kunden, die ihre Mobilitätsgewohnheiten beibehalten und Fahrzeuge mit flüssigen Brennstoffen (schnelle Betankung, hohe Reichweiten) weiterhin nutzen wollen, über das Tanken von zunehmend grünen Kraftstoffen einen Beitrag zum Klimaschutz leisten.

Auch LNF könnten zukünftig von der Technologievielfalt profitieren, da sie, ähnlich wie PKW, ein breites Spektrum an Einsatzzwecken

bedienen. Diese verschiedenen Einsatzzwecke gehen dabei mit unterschiedlichen Anforderungen einher: Bei „kleinen“ LNF, die vor allem kurze Distanzen überbrücken müssen, haben BEV mit (vergleichsweise) kleinen Batterien einen Vorteil. Für größere LNF, bei denen zur Überbrückung weiterer Strecken größere Batterien erforderlich wären, stellen Größe und Gewicht der Batterie hingegen eine signifikante Einschränkung der möglichen Zuladung dar, so dass der Einsatz von E-Fuels von Vorteil sein kann.

### Technologiemix entlastet beim Ausbau der EE-Stromerzeugung und bei den Übertragungsnetzen in Deutschland

Die vorangegangenen Analysen haben gezeigt, dass der Einsatz von BEV dann vorteilhaft ist, wenn die Energie, die sowohl zur Herstellung der Batterie als auch zum Laden des Fahrzeugs verwendet wird, einen geringen Emissionsfaktor hat.

Gerade im Hinblick auf den Ladestrom steht Deutschland noch vor einer großen Herausforderung – eine Energieversorgung, basierend ausschließlich auf in Deutschland lokalisierten Erneuerbaren Energien, erscheint eher unrealistisch. Hier bestehen erhebliche Hindernisse hinsichtlich der Standortverfügbarkeit und auch der Akzeptanz des Ausbaus von Erzeugungsanlagen (v.a. bei Onshore Wind).

Grundsätzlich wird also zukünftig der Import von Energieträgern nach Deutschland erforderlich sein. Chemische Energieträger wie beispielsweise E-Fuels zeichnen sich dabei durch ihre hohe Energiedichte aus, die signifikante Vorteile beim Transport und der Speicherung mit sich bringen. Zudem lässt sich für synthetische Kraft- und Brennstoffe bereits in hohem Maße bestehende Infrastruktur wie Pipelines, das Tankstellennetz sowie Speicheranlagen nutzen. Dies verringert auch den notwendigen Ausbau der Stromnetze in Deutschland, der in Teilen der Bevölkerung ebenfalls auf Akzeptanzhürden stößt.

Die Nutzung von E-Fuels zur Defossilisierung des Verkehrssektors würde also auch im Hinblick auf den Ausbau der zukünftigen (erneuerbaren) Energieversorgung in Deutschland zusätzlich Entlastung mit sich bringen.

### Technologiemix stärkt eine robuste Versorgungsstruktur

Um Mobilität auch in der Zukunft uneingeschränkt zu gewährleisten, ist eine flächendeckende Versorgung mit der jeweiligen (aus erneuerbaren Energieträgern gewonnen) Endenergie unabdingbar.

Eine abrupte Umstellung auf rein batterieelektrische Fahrzeuge würde einen prompten Ausbau der Ladeinfrastruktur erfordern und voraussichtlich zu Lücken in der Versorgung mit Mobilität führen.

Für E-Fuels können bereits bestehende Infrastrukturen sofort genutzt werden, ohne dass für den Ausbau zusätzliche Emissionen



## Ein Technologiemix

ermöglicht die Energiewende robuster mit geringeren volkswirtschaftlichen Kosten als eine „One-Fits-All“-Strategie

oder Kosten anfallen. Allein in Deutschland gibt es heute 14.100 Tankstellen<sup>19</sup>, die eine bundesweite Abdeckung gewährleisten.

Die Förderung und Einführung von E-Fuels mittels der bestehenden Infrastruktur für Flüssigkraftstoffe kann also die Versorgung mit Mobilität sicherstellen, noch während die zur Nutzung von BEV erforderliche Infrastruktur ausgebaut wird.

Darüber hinaus kann durch den Technologiemix gewährleistet werden, dass der Ausbau der Ladeinfrastruktur nur dort vorangetrieben wird, wo es wirtschaftlich und aus ökologischen Gesichtspunkten sinnvoll ist.

## NUTZUNG VORHANDENER INFRASTRUKTUR KANN DEN AUSBAU DER LADEINFRASTRUKTUR ENTLASTEN

Voraussetzung für eine umfassende Nutzung von Elektromobilität ist der flächendeckende Rollout von Ladeinfrastruktur. Dabei ist gar nicht so sehr die eigentliche Ladeinfrastruktur ein erheblicher Kostentreiber, sondern die systemweite Vorhaltung der entsprechenden Kapazitäten – sowohl im Hinblick auf die Netze, als auch auf die Verfügbarkeit von Erzeugungsleistung.

Dabei ist zu berücksichtigen, dass Lade- und Tankinfrastruktur auch Optionscharakter bieten muss: Es ist das Kerncharakteristikum von Mobilität, dass die genauen Verkehrsströme räumlich und zeitlich nur bedingt vorhersehbar sind. Dies gilt umso mehr für Deutschland mit seiner zentraleuropäischen Lage und dem daraus resultierenden Transitverkehr-Aufkommen. Entsprechend ist es notwendig, Tank- und Ladeinfrastruktur nicht auf eine optimale Auslastung zu dimensionieren, sondern auf regionale Spitzensituationen. Hierdurch werden zwangsläufig große Teile der Infrastruktur nur zeitweise genutzt und es kommt durchschnittlich zu einer deutlichen Unterauslastung.

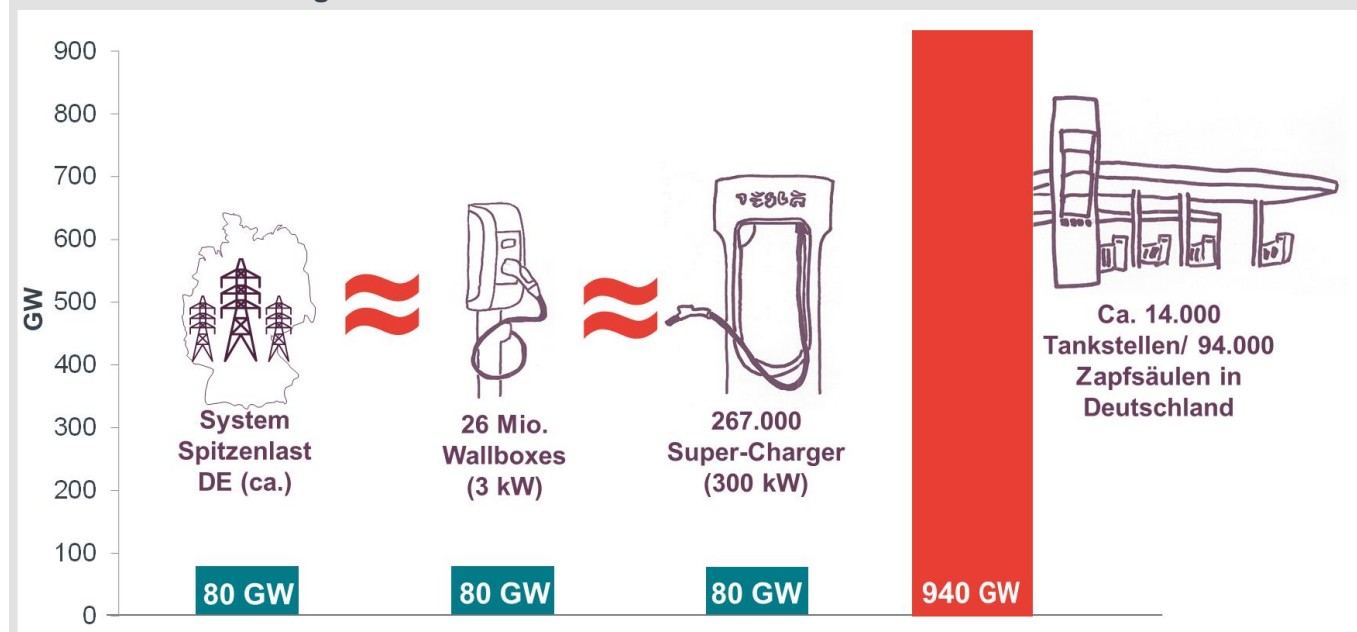
Auf welchem (hohem) Niveau sich die aktuelle Versorgungsinfrastruktur für Fahrzeuge befindet und wie stark die Strom-Ladeinfrastruktur äquivalent ausgebaut werden müsste, zeigt eine einfache überschlägige Rechnung, die **Abbildung 29** illustrativ veranschaulicht:

- In Deutschland sind an Tankstellen rund 94.000 Zapfsäulen verfügbar. Berücksichtigt man die durchschnittliche Dauer eines Tankvorgangs, die dabei erzielten Durchflussmengen und die Energiedichte, so beträgt die durchschnittliche „Leistung“, mit der Energie im Rahmen eines Tankvorgangs in das Fahrzeug übertragen wird, rund 10 MW, also 10.000 kW. D.h. mit der derzeitigen Tankstelleninfrastruktur ist in Deutschland das Äquivalent zu einer (gesicherten) Gesamtleistung von **940 GW** installiert.
- Zum Vergleich: Die elektrische Ladeleistung einer üblichen „Wallbox“ beträgt nur rund 2-3 kW und selbst „Super-Charger“ erreichen nur rund 300 kW. Die aktuelle Spitzenlast im Stromnetz (für sämtliche Stromverbraucher in Deutschland) beträgt zurzeit nur rund **80 GW**.

Diese Größenordnungen machen deutlich, dass selbst unter Berücksichtigung des höheren Wirkungsgrades der Elektromobilität eine flächendeckende Nutzung der Elektromobilität zu einer Vervielfachung der vorzuhaltenden Leistung im Stromsystem führt, würde man auch nur ansatzweise einen Versorgungsgrad anstreben, wie er aktuell bei Tankstellen etabliert ist.

<sup>19</sup> <https://www.adac.de/verkehr/tanken-kraftstoff-antrieb/deutschland/tankstellen-in-deutschland/>, Abgerufen am 10.09.2019

Abbildung 29. Leistungspotential des heutigen Tankstellennetzes im Vergleich zur Strombereitstellung im Mobilitätssektor



Quelle: Frontier Economics

Hinweis: 940 GW thermisch; geschätzte installierte Gesamtleistung der derzeitigen Tankstelleninfrastruktur. 80 GW elektrisch; aktuelle Spitzenlast im Stromnetz (für sämtliche Stromverbraucher in Deutschland). Größenordnungen sind relativ robust über die Zeit zu betrachten, mit marginalen Veränderungen in den letzten Jahren.

### Klimaschutz kann mit Technologiemix schon im Fahrzeugbestand erfolgen

Aktuell stellen ICEV den Bestand der weltweiten Flotte dar – 96% der insgesamt etwa 1,3 Mrd. Fahrzeuge sind Verbrennungsmotofahrzeuge.<sup>20</sup> Dabei fragt die breite Bevölkerung immer mehr Mobilität nach: Nicht nur in Deutschland und der EU<sup>21</sup>, sondern insbesondere in bevölkerungsstarken und wirtschaftlich wachsenden Ländern<sup>22</sup> wie Indien und China<sup>23</sup>.

E-Fuels können mittels der bestehenden Infrastruktur in der aktuellen Flotte weltweit unmittelbar genutzt werden. Dies ist ein großer Vorteil. So ist die Schaffung einer ausreichenden Ladeinfrastruktur für BEV global eine noch größere Herausforderung als in Deutschland oder Europa. Dies gilt insbesondere für Länder, in denen viele Menschen heute nur begrenzten oder gar keinen Zugang zu Elektrizität haben. Dies wird dazu führen, dass in vielen Ländern der Erde Fahrzeuge mit Verbrennungsmotoren auch in Zukunft in hohem Maße nachgefragt werden.

<sup>20</sup> Vgl. [https://www.bcg.com/de-de/d/press/06Nov2017-PM\\_The-Electric-Car-Tipping-Point-175834](https://www.bcg.com/de-de/d/press/06Nov2017-PM_The-Electric-Car-Tipping-Point-175834)

<sup>21</sup> Vgl. Eurostat, Personenkraftwagen je 1.000 Einwohner.

<sup>22</sup> Vgl. <http://www.general-anzeiger-bonn.de/news/wirtschaft/ueberregional/Mehr-Autos-durch-mehr-Pro-Kopf-Einkommen-article3914951.html>, „Eine statistische Erfahrung aus der Volkswirtschaft lautet: Steigt das Pro-Kopf-Volkseinkommen um 1.000 Dollar, erhöht sich die Pkw-Dichte pro 1.000 Einwohner um 13 Autos.“

<sup>23</sup> Vgl. Verband der Automobilindustrie, <https://www.vda.de/de/themen/automobilindustrie-und-maerkte/markt-international/entwicklung-der-globalen-maerkte.html>.

Wird also berücksichtigt, dass global in der nahen Zukunft ein Großteil der PKW Neuzulassungen weiterhin ICEV sein werden, können durch die graduelle Einführung von E-Fuels nicht nur die Emissionen von Fahrzeugen, die bereits jetzt Teil der globalen Flotte sind, sondern auch die der Mehrheit der zukünftigen Neuzulassungen gemindert werden.

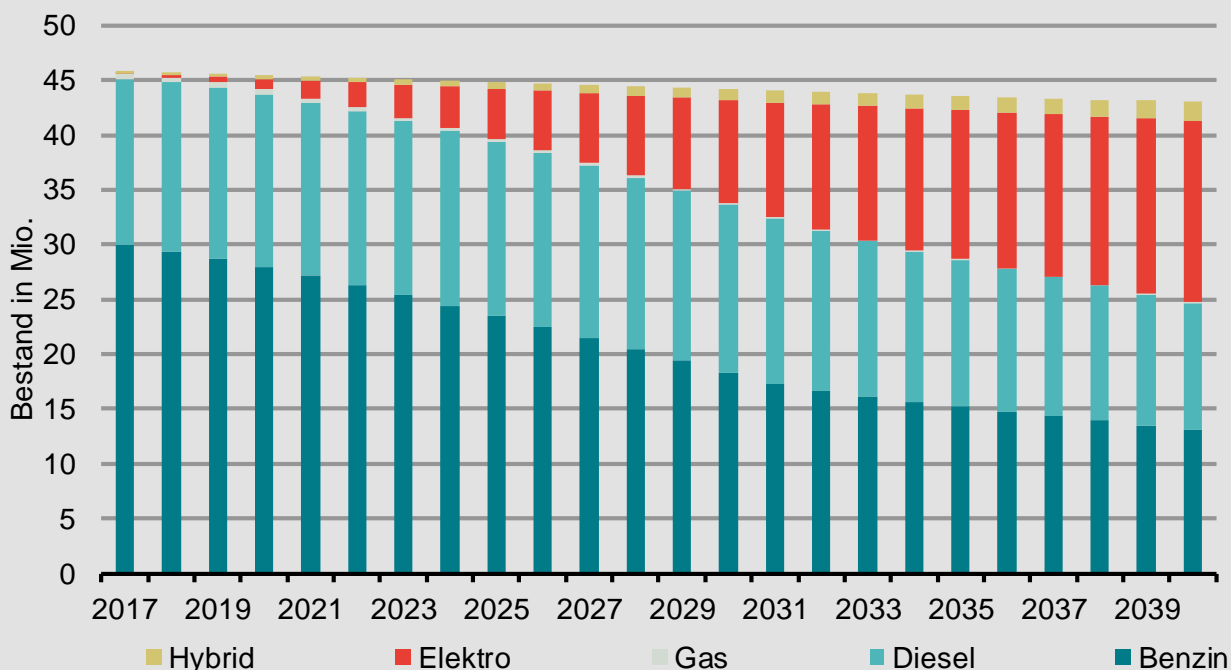
### EXKURS: E-FUELS ALS LÖSUNGSOPTION FÜR DIE BESTANDSFLOTTE

Eine vereinfachte Überschlagsrechnung basierend auf Zahlen des deutschen Kraftfahrt-Bundesamtes (2017) verdeutlicht, dass selbst bei einem, im Vergleich zu heute, sehr hohen Anteil an BEV-Neuzulassungen in den nächsten Jahren der komplette Ersatz der ICEV bis 2050 ohne prohibitive politische Interventionen nicht erreichbar ist (**Abbildung 30**). Tatsächlich wäre im Jahr 2050 nicht einmal jedes zweite Fahrzeug auf Deutschlands Straßen ein Elektroauto, selbst wenn

- die Anzahl der insgesamt neuzugelassenen Fahrzeuge weiterhin bei knapp 2 Mio. pro Jahr liegt; und
- davon der Anteil der neuzugelassenen BEV bei 20% zwischen den Jahren 2020 und 2040 und bei 50% ab dem Jahr 2040 liegt.

Dies zeigt, dass, allein aus der reinen Statistik heraus, Lösungen zur Defossilisierung jenseits der exklusiven BEV-Förderung benötigt werden. In Ergänzung zu den aufgeführten Fallbeispielen für Neufahrzeuge, wo ICEV mit Nutzung von E-Fuels eine weitere Lösungsoption sein können, ist die Anwendung von E-Fuels in der Bestandsflotte bereits unmittelbar möglich: Ob als kontinuierlich steigende Beimengung zu den konventionellen Kraftstoffen oder perspektivisch in reiner Form. Durch die Anwendung von E-Fuels würde perspektivisch der CO<sub>2</sub>-Ausstoß jedes aktuell auf der Straße befindlichen Fahrzeugs gesenkt werden können.

**Abbildung 30. Szenario für die Entwicklung des Fahrzeugbestands in Deutschland**



Quelle: Frontier Economics basierend auf Zahlen des Kraftfahrt-Bundesamtes 2017



## Kosten der Technologien sind systemisch zu erfassen

Neben Kostentreibern wie Energieeffizienz sind auch Anschaffungskosten der Fahrzeuge, Kosten des Ausbaus von Anlagen und Infrastrukturen bis hin zu Kosten der Entsorgung der Fahrzeuge bzw. der Komponenten zu berücksichtigen



## Erneuerbar erzeugter Strom im Ausland deutlich kostengünstiger!

Dieser kann zukünftig in Form von E-Fuels importiert werden

## Technologiemix senkt Kosten, sichert Bezahlbarkeit und Fortschritt über Wettbewerb

Durch die Nutzung der vorhandenen Infrastruktur und Energieanwendungen sowie aufgrund der guten Handhabbarkeit und Speicherbarkeit spart der Einsatz von synthetischen Kraft- und Brennstoffen – ergänzend zur Elektrifizierung – in erheblichem Maße Kosten im Energiesystem. Diesen Kostenersparnissen stehen bestimmte zusätzliche Kosten gegenüber:

- Kostenersparnisse ergeben sich zum Beispiel durch
  - die Nutzung bestehender Infrastrukturen wie Tankstellen, Speichern etc.; sowie
  - die Nutzung von vorhandenen und weniger teuren Anwendungstechnologien, wie z.B. Verbrennungsmotoren mit Tank vs. elektrischen Motoren mit Batterie.
- Zusätzliche Investitionskosten betreffen beispielsweise
  - Elektrolyseure zur Herstellung von Wasserstoff, Synthesanlagen zur Herstellung von synthetischen Flüssigkraftstoffen oder Methan sowie Anlagen zur Gewinnung von CO<sub>2</sub> (z.B. Direct Air Capture, d.h. Gewinnung von CO<sub>2</sub> aus der Luft); und
  - Anlagen für Erneuerbare Energien, die aufgrund der Umwandlungsverluste bei der Herstellung der synthetischen Kraft- und Brennstoffe zusätzlich errichtet werden müssen.

Bei der Beurteilung der Wirtschaftlichkeit von synthetischen Kraft- und Brennstoffen sind also nicht nur die – in der öffentlichen Debatte oft im Vordergrund stehenden – Umwandlungsverluste der Herstellung von E-Fuels entscheidend. Vielmehr müssen auch die jeweiligen Wirkungen auf Investitionen und Ausbaubedarfe in Erzeugung, Umwandlung, Speicher und Netze berücksichtigt werden.

Zudem lassen sich in vielen Regionen der Welt Erneuerbare Energien in Form von Sonne, Wind, Wasser und Biomasse deutlich kostengünstiger gewinnen als in Mitteleuropa. Umgewandelt als synthetische Kraft- und Brennstoffe lassen sich diese flüssig und gasförmig zu anteilig geringen Transportkosten<sup>24</sup> – und unter Rückgriff auf die vorhandene Pipeline-, Umschlag-, Zwischenlager- und

<sup>24</sup> Unsere Analysen für die Agora Energie- und Verkehrswende (2018) zeigen, dass Transportkosten rund 0,5% der Gesamtkosten der Produktion von E-Fuels ausmachen. Mit der Annahme, dass Gase über Tanker transportiert (und somit liquifiziert und regasifiziert werden müssen) ist der Transportkostenanteil der Produktion von synthetischen Kraft- und Brennstoffen in gasförmiger Form mit 7% der Gesamtkosten höher – jedoch auch hier anteilig immer noch gering und man kann in vielen Ländern auch vorhandene Pipeline-Infrastruktur nutzen, die mit geringeren Kosten verbunden ist.



Tankschiff-Infrastruktur – in Europa nutzen. So zeigen Analysen<sup>25</sup>, dass sich an Standorten im Ausland wie Nordafrika, dem Nahen Osten oder auch Island langfristig synthetische Kraft- und Brennstoffe deutlich effizienter bereitstellen lassen, als bei einer heimischen Herstellung. Beispielsweise können synthetische Kraftstoffe via Photovoltaik in Nordafrika 30% günstiger bereitgestellt werden als auf Basis von Offshore-Winderzeugung in der Nord- und Ostsee.

Gerade bei einkommensschwachen Haushalten ist die Nutzung von relativ günstigen klassischen Fahrzeugen mit Verbrennungsmotoren von Vorteil. Die betroffenen Kunden sind häufig auf die Nutzung von Gebrauchtwagen oder günstigen Neufahrzeugen angewiesen, gleichzeitig ist die erforderliche Fahrleistung in vielen Fällen moderat. Gerade für diese Bevölkerungsgruppe ist es wichtig, die Kosten klimaschonender Mobilität so gering wie möglich zu halten und hohe Anschaffungsinvestitionen zu vermeiden. Dies ist insbesondere relevant, da der Anteil des Einkommens, der für Kraftstoffe aufgewendet werden muss, bei den Haushalten mit geringsten Einkommen am höchsten ist<sup>26</sup>.

---

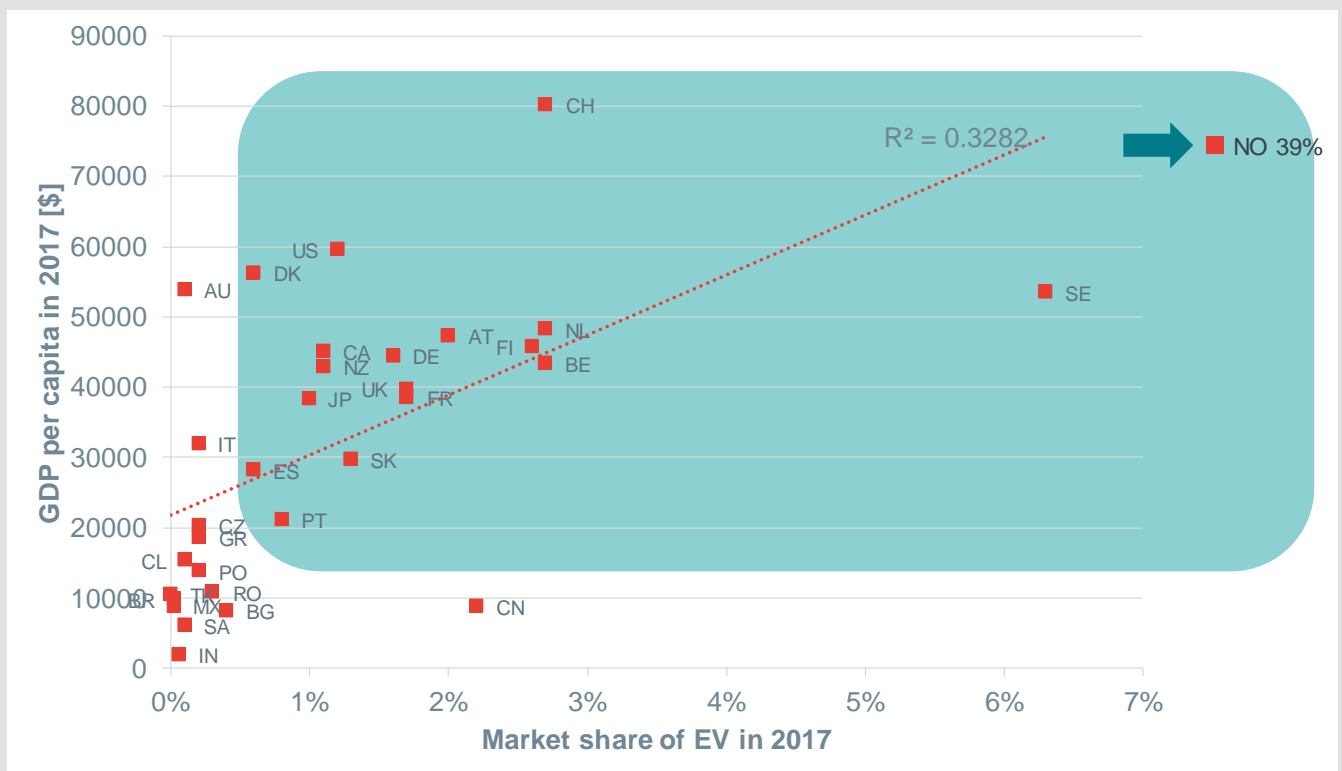
<sup>25</sup> Agora Verkehrswende, Agora Energiewende und Frontier Economics (2018): Die zukünftigen Kosten strombasierter synthetischer Brennstoffe.

<sup>26</sup> Vgl. IW (2019), CO<sub>2</sub> Vermeidung im Straßenverkehr.

## ELEKTROMOBILITÄT IST HEUTE NUR AUF WOHLHABENDE LÄNDER BESCHRÄNKT

Der Aufstieg der Elektromobilität ist heute und auf absehbare Zeit ganz überwiegend auf relativ wohlhabende Staaten fokussiert. Dies ist ersichtlich, wenn das Bruttoinlandsprodukt pro Kopf dem Anteil der Elektrofahrzeuge bei Neuzulassungen gegenübergestellt wird (**Abbildung 31**). Gründe hierfür dürften v.a. die in vielen Ländern fehlenden Infrastrukturen sowie die hohen Anschaffungskosten für E-Fahrzeuge sein. In diesen Ländern werden auf absehbare Zeit weiterhin Fahrzeuge mit Verbrennungsmotoren nachgefragt werden.

**Abbildung 31. Pro-Kopf-BIP versus Marktanteil von Elektrofahrzeugen im Ländervergleich**



Quelle: Frontier Economics basierend auf Daten der Weltbank, der International Energy Agency und der European Alternative Fuels Observatory

Weiterhin erfolgt in der Realität häufig eine Nachnutzung in Westeuropa ausgemusterter Fahrzeuge zum Beispiel in Osteuropa, oftmals später auch in anderen Weltregionen wie Afrika. Fällt diese Nachnutzung weg, da zum Beispiel für Elektrofahrzeuge in diesen Ländern keine Ladeinfrastruktur ausgebaut ist, vermindert sich die durchschnittliche Gesamtnutzungsdauer der Fahrzeuge. Dies erhöht zum einen die Kosten der Mobilität in Deutschland bzw. Europa wie auch in den Drittstaaten, zum anderen ist eine schnellere Erneuerung der Gesamtfahrzeugflotte erforderlich. Letzteres geht auch mit einem Anstieg CO<sub>2</sub>-Emissionen einher, da für die Herstellung der Fahrzeuge wiederum Emissionen anfallen und in den Ländern, in denen eine Zweit- und Drittnutzung der Fahrzeuge entfällt, ggf. noch ältere und damit weniger effiziente Fahrzeuge im Bestand bleiben.

## 6.3 Die nächsten Schritte sind entscheidend

Die Analyse zeigt, dass eine verkehrs- und energiepolitische Strategie unter Einschluss aller Technologieoptionen, einschließlich batterieelektrischer Fahrzeuge, wie auch von E-Fuels, zur Senkung des CO<sub>2</sub>-Ausstoßes im Straßenverkehr geboten ist. Allerdings sind die Weichen für einen offenen und zukunftsorientierten Politik- und Regularienansatz jetzt zu stellen. Die folgenden Schritte sind hierfür erforderlich:

### 1. Technologien müssen konsequent anhand der Vogel-, nicht der Froschperspektive, bewertet werden

In der klimapolitischen Debatte sollten bei der Bewertung von Technologien (also auch der Antriebssysteme von Fahrzeugen) umfassend und gesamtheitlich alle Klimaeffekte berücksichtigt werden. Dies bedeutet, dass die Bewertung der Technologien sich auf die Klimawirkung über alle Nutzungsphasen von Fahrzeugen, über Ländergrenzen hinweg und über den gesamten relevanten Zeitraum erstrecken sollte.

### 2. Kein Fokus auf nur eine Technologie – die Klimapolitik muss einen zielkonformen Technologiemarkt ermöglichen und fördern

Eine frühzeitige Festlegung auf nur eine Technologie ist weder klimapolitisch begründbar, noch wird sie der Bedarfsvielfalt in der Lebenswirklichkeit der Verbraucher gerecht. Daher kann die Klimawende nur mit einem Mix aus Technologien gelingen.

### 3. Es sind so schnell wie möglich regulatorisch faire und offene Rahmenbedingungen zu gewährleisten

Zu den aussichtsreichen Antriebstechnologien für den Straßenverkehr zählen neben batterieelektrischen auch mit E-Fuels angetriebene Fahrzeuge. Hinzu kommen in Deutschland bzw. Europa möglicherweise Fahrzeuge, die mit Wasserstoff (Brennstoffzellenfahrzeuge oder Wasserstoffverbrenner), synthetischem Methan (heutige Erdgasfahrzeuge) oder Methanol (z.B. in China stärker verbreitet) angetrieben werden.

Um alle diese Optionen voranzutreiben, ist es so schnell wie möglich erforderlich, alle Technologien gleichermaßen in den regulatorischen Rahmen zur Senkung der CO<sub>2</sub>-Emissionen im Straßenverkehr einzubeziehen. Dies betrifft insbesondere auch die EU-Direktiven. So sollte im Rahmen der Festsetzung von Emissionsnormen für neue Personenkraftwagen und leichte Nutzfahrzeuge<sup>27</sup> der Einsatz von E-Fuels auf die Flottenziele der Autohersteller anerkannt werden, bestenfalls noch vor dem geplanten Review der CO<sub>2</sub>-Flottenregulierung in 2022/2023. Dies gilt für den PKW-Bereich wie

<sup>27</sup> Vgl. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:32019R0631>

auch den Bereich der Nutzfahrzeuge. Auch sollte die Ungleichbehandlung von E-Fuels und elektrischen Antrieben in der aktuellen, überarbeiteten Richtlinie für Erneuerbaren Energien (RED II)<sup>28</sup> bezüglich der EE-Anerkennungsquoten angepasst werden.

Weiterhin sind nationale Energieprogramme, Gesetzesvorhaben und technische Normen (z.B. bezüglich der erlaubten Beimengungsquoten für E-Fuels) so anzupassen, dass die Ausweitung des Einsatzes von E-Fuels möglich ist. Die Voraussetzungen für die Markteinführung und für den Markthochlauf von E-Fuels sind so sicherzustellen. Nur dadurch kann ein technologieoffener Wettbewerb zwischen aussichtsreichen Technologien stattfinden und zum bestmöglichen, d.h. klimafreundlichsten und kostengünstigsten Technologiemix führen.

#### **4. Staatliche Förderprogramme sind für E-Fuels-Vorhaben zu öffnen**

Derzeit ist die Förderung von neuen Technologien noch unerlässlich. Dies gilt für die Etablierung der batterieelektrischen Fahrzeuge genauso wie für E-Fuels oder andere neue Technologieoptionen (z.B. Wasserstoff).

Es ist sicherzustellen, dass E-Fuels bei entsprechenden Förderprogrammen auf europäischer, nationaler sowie Länderebene Berücksichtigung finden. Ein einseitiges Förderregime (z.B. mit Fokus auf batterieelektrische Fahrzeuge) kann nicht geförderte neue Technologieansätze verdrängen und so die erforderliche Technologievelfalt gefährden. E-Fuels sollten als potenzielle Lösung für eine Bandbreite an Anwendungen anerkannt werden und somit nicht nur in Nischenanwendungen zum Einsatz kommen. So ist es ein Anfang, dass im Rahmen der jüngst ausgewählten 20 Reallabore<sup>29</sup> immerhin ein Projekt für die Herstellung und den Einsatz von flüssigen E-Fuels (in dem Fall grünes Methanol für den Schiffs- und Schwerlastverkehr) gefördert wird.

#### **5. Innovationen bei Antrieben, Antriebstechnologien und Kraftstoffen müssen in eine verkehrspolitische Gesamtstrategie eingebettet werden**

In Ergänzung zu den hier betrachteten Technologien sind für die zu erreichenden CO<sub>2</sub>-Reduktionen weitere verkehrspolitische Strategien und Optionen vorhanden. Dazu gehören die Verkehrsvermeidung, die Verlagerung von Verkehren auf ÖPNV und Bahn oder intelligente Lösungen wie Car-Sharing-Konzepte. Innovationen bei Antrieben, Antriebstechnologien und Kraftstoffen müssen deshalb in eine verkehrspolitische Gesamtstrategie eingebettet werden. Al-

<sup>28</sup> Vgl. [https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=uri-serv:OJ.L\\_2018.328.01.0082.01.ENG&toc=OJ:L:2018:328:TOC](https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=uri-serv:OJ.L_2018.328.01.0082.01.ENG&toc=OJ:L:2018:328:TOC)

<sup>29</sup> Vgl. [https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Downloads/P-R/reallabore-der-energiegewinnender-ideenwettbewerb-steckbriefe.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=9](https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Downloads/P-R/reallabore-der-energiegewinnender-ideenwettbewerb-steckbriefe.pdf?__blob=publicationFile&v=9)

lerdings ist hierbei essentiell, dass individuelle Mobilität ein Grundbedürfnis bleiben wird und Mobilitätsverzicht in breiten Bevölkerungsschichten voraussichtlich auf wenig Akzeptanz stoßen wird.

## **6. Verkehrs- und Klimapolitik muss global gedacht werden**

Die Minderung von Treibhausgasemissionen ist ein globales Erfordernis. Insofern ist es essentiell und allgemein anerkannt, dass CO<sub>2</sub>-Minderungen in einer Region nicht zu steigenden Emissionen in anderen Regionen führen dürfen, wie dies heute z.B. durch die Emissionsverlagerung von Europa nach China durch den Import von Batterien für BEV der Fall ist. Darüber hinaus ist es gerade für eine Exportnation wie Deutschland erforderlich, dass Technologiestrategien nicht nur in Deutschland oder Europa, sondern auch in anderen Geographien wie Afrika klimapolitisch einsetzbar sind. Eine reine Elektrifizierungsstrategie ist in diesen Ländern nicht denkbar, haben doch derzeit immer noch 1,6 Mrd. Menschen keinen Zugang zu Elektrizität.<sup>30</sup> Die Herstellung synthetischer Brenn- und Kraftstoffe kann von den Industrienationen, die heute wie z.B. Deutschland Know-how-Vorreiter sind, in Ländern mit hohen EE-Potenzialen angestoßen werden. Dies ermöglicht nicht nur mittel- und langfristig wirksame Treibhausgasminderungen, sondern zugleich auch nachhaltige Wertschöpfung in Regionen, die wirtschaftliche Wachstumsperspektiven dringend benötigen.

---

<sup>30</sup> World Energy Council (2019), <https://www.worldenergy.org/PUBLICATIONS/entry/inter-connectivity-benefits-and-challenges>

## ANHANG A ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS

---

|                       |   |
|-----------------------|---|
| <b>BEV</b>            | Batterieelektrisches Fahrzeug (battery electric vehicle)                                  |
| <b>BMWi</b>           | Bundeswirtschaftsministerium  |
| <b>CO<sub>2</sub></b> | Kohlenstoffdioxid   |
| <b>E-Benzin</b>       | Synthetisch hergestelltes Benzin aus erneuerbarem Strom und einer CO <sub>2</sub> -Quelle |
| <b>E-Diesel</b>       | Synthetisch hergestellter Diesel aus erneuerbarem Strom und einer CO <sub>2</sub> -Quelle |
| <b>EE</b>             | Erneuerbare Energien  |
| <b>FCEV</b>           | Brennstoffzellenfahrzeug (fuel cell electric vehicle)                                     |
| <b>FZ</b>             | Fahrzeug  |
| <b>ICEV</b>           | Herkömmliches Fahrzeug mit Verbrennungsmotor (internal combustion engine vehicle)         |
| <b>IEA</b>            | International Energy Agency   |
| <b>LCA</b>            | Lebenszyklusanalyse (life cycle analysis/assessment)                                      |
| <b>TtW</b>            | Tank-to-Wheel   |
| <b>WtW</b>            | Well-to-Wheel   |

## ANHANG B METHODIK DER ANALYSE

---

In diesem Anhang erläutern wir detailliert, wie wir die CO<sub>2</sub>-Emissionen je Wertschöpfungsstufe entlang des Lebenszyklus im Modell ermitteln.

Grundsätzlich untergliedern wir den Lebenszyklus eines Fahrzeugs in vier Stufen:

- Die Fahrzeugherstellung mit Fokus auf die Antriebssysteme (Cradle-to-Gate),
- die Erzeugung der Antriebsenergie für den jeweiligen Antrieb (Well-to-Tank),
- die Fahrzeugnutzung (Tank-to-Wheel); sowie
- schließlich das Recycling des Fahrzeugs (End-of-Life).

Für alle vier Stufen stellen Strom- und Energiemix des Herstellungs- bzw. Betriebslands zentrale Einflussfaktoren dar. Daher werden diese als übergeordnete Inputfaktoren für die einzelnen Länder im Zeitverlauf hergeleitet.

### Übergeordnete Inputfaktoren

#### Strommix

Der Strommix ist sowohl für die Herstellung des Fahrzeugs als auch für die eigentliche Nutzung relevant und im Modell entsprechend für alle möglichen Herstell- (EU, USA, Japan, China) und Betriebsländer (EU, Deutschland) hinterlegt.

Für das Modell ist dabei insbesondere die CO<sub>2</sub>-Intensität (bzw. der Emissionsfaktor) des jeweiligen Strommixes relevant. Diesen ermitteln wir für Japan, China, die USA und die EU mit Hilfe des World Energy Outlook 2018 (WEO) der International Energy Agency (IEA). Diese nimmt für drei Szenarien sowohl eine Schätzung der gesamten erzeugten Strommenge, sowie der daraus resultierenden CO<sub>2</sub>-Emissionen vor, aus der sich der Emissionsfaktor herleiten lässt. Neben einem Referenzszenario (dem sogenannten „New Policies“-Szenario) sind Prognosen für ein optimistisches Szenario verfügbar (dem sogenannten „Sustainable Development“-Szenario), in dem die Ziele der UN erreicht werden, sowie ein pessimistisches („Current Policies“-) Szenario, in dem lediglich die bestehenden Gesetze und Regulierungen fortgeführt werden.

Für Deutschland weist die IEA keine eigene Prognose aus. Daher basieren unsere Analysen hinsichtlich des Emissionsfaktors hier auf den „Langfristszenarien für die Transformation des Energiesystems in Deutschland“, die im Auftrag des BMWi erstellt wurden. Zum Zeitpunkt der Modellierung war hier nur Berichtsmodul 3, welches das Basis- sowie das Referenzszenario (entsprechend dem Referenz- und pessimistischen Szenario der IEA) umfasst, verfügbar. Entsprechend haben wir für den Emissionsfaktor des Deutschen Strommixes in einem optimistischen Zukunftsszenario (analog zu dem der IEA) eine eigene Schätzung vorgenommen. Dieser basiert auf der Annahme, dass das Verhältnis der Emissionen im optimistischen Szenario zu denen im Referenzszenario in Deutschland identisch zu denen der EU ist.

Weder die IEA noch das BMWi berücksichtigen Emissionen aus dem Anlagenausbau, der erforderlich ist, um die geplanten Strommengen aus erneuerbaren Energien bereit zu stellen. Wir ergänzen die Ansätze

der IEA und des BMWi entsprechend um diese, basierend auf eigenen Schätzungen nach Durchsicht der bestehenden Literatur.<sup>31</sup>

## Energiemix

Auch der Energiemix geht als übergeordneter Inputfaktor an einer Vielzahl von Stellen im Modell ein. Diesbezüglich wird im Modell für alle Analysestufen der Energiemix des Betriebslandes angenommen (und nicht der des Herstelllandes). Da im Modell Deutschland und die EU als Betriebsland ausgewählt werden können, weisen wir den Energiemix für diese beiden Regionen aus. Wie beim Strommix basieren die Prognosen für die EU auf dem WEO, die für Deutschland auf den Langfristszenarien des BMWi. Aus beiden Quellen ermitteln wir dabei den Emissionsfaktor mit Hilfe der Gesamt-CO<sub>2</sub>-Emissionen sowie des Primärenergieverbrauchs.

Analog zum Strommix war auch für den Energiemix zum Zeitpunkt der Modellierung vom BMWi noch kein optimistisches Szenario für Deutschland verfügbar. Entsprechend haben wir auch den Emissionsfaktor für den deutschen Energiemix in einem optimistischen Zukunftsszenario geschätzt. Dieser basiert auf der Annahme, dass das Verhältnis der Emissionen im optimistischen Szenario zu denen im Referenzszenario in Deutschland identisch zum Verhältnis der Emissionen im optimistischen Szenario zu denen im Referenzszenario in der EU ist.

## Analysestufen im Detail

### 1. Analysestufe: Fahrzeugherstellung

Die erste Analysestufe im CO<sub>2</sub>-Lebenszyklus eines Fahrzeugs ist die Fahrzeugherstellung. Emissionen auf dieser Stufe entstammen, je nach Antriebstechnologie,

- der Herstellung des Antriebs (also des (E-)Motors),
- des Speichermediums (Batterie oder Tank); und
- der Karosserie.

Grundsätzlich basiert das Modell auf der Annahme, dass pro Lebenszyklus ein Fahrzeug erforderlich ist, also keine Verschleißteile vor dem eigentlichen Lebensende ausgetauscht werden müssen. Eine Ausnahme hiervon bildet die Batterie des batterieelektrischen Fahrzeugs.

Mit den bestehenden Technologien lässt sich die Batterie eines batterieelektrischen Fahrzeugs bei einer optimalen Depth-of-Discharge von 80% (zu Deutsch etwa „Entladungstiefe“) etwa 1.000 Mal laden<sup>32</sup>, bevor sie an Kapazität (und damit an Reichweite) verliert. In Kombination mit der Kapazität der Batterie und dem Verbrauch pro Kilometer ergibt sich hieraus also eine maximale Lebensleistung (in Kilometern) pro Batterie.

Modellseitig ist es dem Nutzer überlassen

- nichtsdestotrotz lediglich *eine* Batterie pro Lebenszyklus anzunehmen (der hypothetische Fahrer nimmt also die schlechtere Leistung der Batterie und die kürzere Reichweite des Fahrzeugs in Kauf und nutzt es weiterhin, ohne die Batterie auszutauschen),
- eine neue Batterie *anteilig* an der Lebensfahrleistung zuzurechnen (dies entspräche der Weiterverwendung der Batterie nach dem Lebensende des Fahrzeugs – etwa in einem anderen Fahrzeug) oder

<sup>31</sup> Vgl. z.B. Onat, Kucukvar und Tatari (2015), Conventional., Hybrid, Plug-in hybrid or Electric Vehicles? State-based Comparative Carbon and Energy Footprint Analysis in the United States, Supporting Information File I.

<sup>32</sup> Vgl. Peters et al. (2017), The environmental impact of Li-Ion batteries and the role of key parameters – A review, Renewable and Sustainable Energy Reviews 67 (2017) 491–506.



- die eventuell erforderliche zweite Batterie voll dem Lebenszyklus zuzuschreiben (hier liegt die Annahme zu Grunde, dass die zweite Batterie gemeinsam mit dem Fahrzeug und damit vor ihrem eigentlichen Lebensende verschrottet wird).

An dieser Stelle hat der Nutzer zudem die Möglichkeit, eine Annahme hinsichtlich der Depth-of-Discharge, also bezüglich des Ladeverhaltens des Fahrers, zu treffen. Eine höhere Depth-of-Discharge verringert dabei die maximale Anzahl an Ladezyklen und macht somit einen früheren Austausch der Batterie erforderlich.

Unsere Schätzung der Emissionen aus der Herstellung der Batterie basiert auf dem Stromverbrauch, der erforderlich ist, um eine Kilowattstunde Batteriekapazität herzustellen. Die Emissionen aus dem jeweiligen Stromverbrauch werden dann mit der relevanten Batteriekapazität multipliziert.

Für alle weiteren Komponenten dieser Analysestufe nehmen wir fixe Emissionen basierend auf Daten aus dem Jahr 2017 an und dynamisieren diese mittels einer Kopplung an die Entwicklung des Energiemixes im Zeitverlauf. Durch diese Dynamisierung werden technische Verbesserungen und Entwicklungen, die sich aktuell weder absehen noch quantifizieren lassen, berücksichtigt. Die Herstellung eines Fahrzeugs im Jahr 2025 verursacht also mehr Emissionen als die Herstellung des identischen Fahrzeugs im Jahr 2035.

## 2. Analysestufe: Erzeugung Antriebsenergie

In der zweiten Analysestufe betrachten wir die Emissionen, die bei der Herstellung der Antriebsenergie entstehen. Konkret bedeutet dies

- für das batterieelektrische Fahrzeug: Die Emissionen aus der Erzeugung des Stroms, der erforderlich ist, um die Batterie zu Laden.
- für Fahrzeuge mit Verbrennungsmotor: Die Emissionen aus der Herstellung der erforderlichen Menge an Benzin, Diesel oder synthetischem Kraftstoff.

Der Stromverbrauch des batterieelektrischen Fahrzeugs ergibt sich direkt aus dem vorgegebenen Verbrauch pro Kilometer und der Kilometerleistung pro Jahr bzw. Lebenszyklus. Beim Laden kann es zu Ladeverlusten verschiedenen Ausmaßes kommen. Um dem Rechnung zu tragen, nehmen wir pauschal Ladeverluste in Höhe von 20% an (basierend auf Schätzungen des VDI<sup>33</sup>) und passen den effektiven Stromverbrauch um diesen Faktor an. Wir haben in dieser Analysestufe keine (möglichen) Mehremissionen aus dem zusätzlichen Netzausbau berücksichtigt, da das Ausmaß des erforderlichen Ausbaus sowie der entstehenden Emissionen noch schwer abzuschätzen ist.

Für das Fahrzeug mit Verbrennungsmotor sind die Emissionen je Liter hergestellten Kraftstoffs ausschlaggebend. Diese werden mittels der Energiedichte und dem Volumen des Kraftstoffs hergeleitet. Wie viele Liter eines Kraftstoffes für ein Fahrzeug insgesamt hergestellt werden müssen, hängt von der dritten Analysestufe ab, nämlich dem Verbrauch des Fahrzeugs sowie der Kilometer, Jahres- oder Lebensleistung. Bei konventionellem Kraftstoff nehmen wir zudem pauschal einen Biokraftstoffanteil von 5% (Benzin) bzw. 7% (Diesel) an. Die geringere Energiedichte von Biokraftstoffen wird durch die Berechnung mit Hilfe des Energiegehalts pro Volumeneinheit automatisch berücksichtigt.

Den Anteil synthetischer Kraftstoffe am Gesamtmix kann der Nutzer selbst im Control Panel auswählen.

---

<sup>33</sup> Brennstoffzellen- und Batteriefahrzeuge Bedeutung für die Elektromobilität. VDI/VDE-Studie, Mai 2019.

Für die Emissionen aus der Erzeugung der Antriebsenergie nehmen wir eine Reduktion des Kraftstoffverbrauchs über die Zeit an („Effizienzfaktor“).

Dabei wird im Modell basierend auf Daten des Umweltbundesamtes über die historische Entwicklung des Kraftstoffverbrauchs eine jährliche Verringerung des Kraftstoffverbrauchs von ca. 1% angenommen.

Bei batterieelektrischen Fahrzeugen ist bedingt durch das junge Stadium der Technologie die Datenbasis zur Schätzung zukünftiger Effizienzsteigerungen noch wenig ausgeprägt. Aufbauend auf Prognosen der Agora Verkehrswende<sup>34</sup> hinterlegen wir im Modell eine jährliche Effizienzsteigerung von 0,37%.

Diese Effizienzsteigerungen gehen dabei nur einmal bedingt durch das Jahr der Anschaffung ein, der Verbrauch eines Autos bleibt über den Lebenszyklus hinweg konstant.

### 3. Analysestufe: Fahrzeugnutzung

In der Fahrzeugnutzung fallen allein für den klassischen Verbrenner Emissionen an. Bei batterieelektrische Fahrzeugen entsteht „Tank-to-Wheel“ kein CO<sub>2</sub>.

Für den Verbrenner entstehen, bedingt durch die zugrundeliegenden, chemischen Reaktionen, Emissionen pro verbranntem Liter Kraftstoff. In Verbindung mit dem Verbrauch des jeweiligen Fahrzeugtypen berechnen wir so die Emissionen pro Kilometer, bzw. Jahres- und Lebensleistung. Die Verbrauchsannahmen sind dabei unterschiedlich für benzin- und dieselbetriebene Fahrzeuge, unterscheiden sich aber nicht bei konventionellem und synthetischem Kraftstoff.

Eine Dynamisierung erfolgt hier, wie auch in der vorigen Analysestufe, allein durch die Effizienzsteigerungen im Kraftstoffverbrauch, da der chemische Verbrennungsprozess an sich unveränderlich ist.

### 4. Analysestufe: End-of-Life/Recycling

Die letzte Analysestufe ist das Lebensende des Fahrzeugs.

Hier setzen wir einen pauschalen Wert für die Emissionen an, die am Lebensende der Autokarosserie entstehen. Dieser ist für alle Antriebsenergien identisch, impliziert also indirekt, dass die Karosserie sich zwischen den verschiedenen Antriebsenergien nicht unterscheidet. Wie die Herstellung einiger Fahrzeugkomponenten ist auch dieser mittels einer Kopplung an die Entwicklung des Energiemix zeitlich dynamisiert.

Für die Batterie des BEV ist im Modell ein Emissionsfaktor je Energieeinheit (Kilowattstunde Batteriekapazität) hinterlegt, mittels dem, gemeinsam mit der dem ausgewählten Fahrzeugtyp entsprechenden Batteriegröße, die Gesamtemissionen ermittelt werden. Auch dieser Wert ist an den Energiemix gekoppelt und somit dynamisiert. Dieses Vorgehen ist durch die spärliche Datenbasis für die Emissionen bedingt, die bei der Entsorgung oder dem Recycling eines Fahrzeugs oder einzelner Fahrzeugteile entstehen. Insbesondere für die Batterie des batterieelektrischen Fahrzeugs sind die Recyclingtechnologien noch nicht standardisiert. Der Fokus liegt hier aktuell zudem primär auf der Rückgewinnung knapper Ressourcen und weniger auf einem möglichst energieeffizienten oder emissionsarmen Vorgehen.

<sup>34</sup> Siehe Agora Verkehrswende, Klimabilanz von Elektroautos, [https://www.agora-verkehrswende.de/fileadmin/Projekte/2018/Klimabilanz\\_von\\_Elektroautos/Agora-Verkehrswende\\_22\\_Klimabilanz-von-Elektroautos\\_WEB.pdf](https://www.agora-verkehrswende.de/fileadmin/Projekte/2018/Klimabilanz_von_Elektroautos/Agora-Verkehrswende_22_Klimabilanz-von-Elektroautos_WEB.pdf)

## ANHANG C LIMITATIONEN UNSERER ANALYSE AUF DEN VERSCHIEDENEN WERTSCHÖP- FUNGSSTUFEN

---

Unsere Analyse geht nur bis zu einem bestimmten Detailgrad. Vereinfachungen, die wir vorgenommen haben, haben verschiedene Auswirkungen auf den jeweiligen Wertschöpfungsstufen:

- Bei der **Fahrzeugherstellung** beachten wir keine Effizienzgewinne in der Batterieherstellung im Zeitverlauf oder unterschiedliche chemische Spezifikationen der Batterie. Des Weiteren nehmen wir (vereinfachend) an, dass alle Fahrzeuge innerhalb einer Fahrzeugklasse die gleiche Karosserie haben.
- Für die **Erzeugung der Antriebsenergie basierend auf Erneuerbaren Energien** berücksichtigen wir zwar die Emissionen für den Zubau an EE-Anlagen (vor allem Solar und Wind)<sup>35</sup>, jedoch nicht die im Rahmen des erforderlichen Ladeinfrastrukturausbaus verbundenen Emissionen. Entsprechend gehen auch Emissionen aus dem Anlagenbau und Transport flüssiger Kraftstoffe nicht in unsere Analyse ein. Grundsätzlich nehmen wir auch für alle Fahrzeugsegmente und Antriebe einen konstanten Verbrauch über den Lebenszyklus und Tank- bzw. Batteriestand an. Ebenso berücksichtigen wir das Betriebsland nur hinsichtlich des Strommixes, nicht aber hinsichtlich klimatischer oder geographischer Bedingungen.
- Für die **Fahrzeugnutzung** ist darüber hinaus relevant, dass wir einen möglichen Rebound-Effekt nicht miteinbeziehen. Einige Studien gehen davon aus, dass mit dem Kauf von BEV auch eine Nutzungsveränderung einhergeht – beispielsweise, dass BEV tendenziell als zusätzliches Fahrzeug dienen anstatt ausgediente Fahrzeuge zu ersetzen. Auf diesen Aspekt gehen wir jedoch nicht ein.

Zum **Recycling** sind bisher grundsätzlich wenig Daten verfügbar (mehr dazu in Methodik der Analyse). Unter anderem aufgrund der schwierigen Datenlage berücksichtigen wir vor allem keine „Gutschriften“ aus Materialrecycling (also der Vermeidung von zukünftigen Emissionen) oder Second-Life-Anwendungen einzelner Komponenten wie zum Beispiel der Batterie

---

<sup>35</sup> Wegen der Umwandlungsverluste von grünem Strom zu E-Fuels werden vereinfacht mehr EE-Anlagen angenommen als für direkte Nutzung von grünem Strom.

