



Dokumentation

Emissionsausstoß und CO₂-Vermeidungskosten von Elektro- und Plug-In-Hybrid-Autos

Emissionsausstoß und CO₂-Vermeidungskosten von Elektro- und Plug-In-Hybrid-Autos

Aktenzeichen: WD 5 - 3000 - 067/22
Abschluss der Arbeit: 30.06.2022
Fachbereich: WD 5: Wirtschaft und Verkehr, Ernährung und Landwirtschaft

Die Wissenschaftlichen Dienste des Deutschen Bundestages unterstützen die Mitglieder des Deutschen Bundestages bei ihrer mandatsbezogenen Tätigkeit. Ihre Arbeiten geben nicht die Auffassung des Deutschen Bundestages, eines seiner Organe oder der Bundestagsverwaltung wieder. Vielmehr liegen sie in der fachlichen Verantwortung der Verfasserinnen und Verfasser sowie der Fachbereichsleitung. Arbeiten der Wissenschaftlichen Dienste geben nur den zum Zeitpunkt der Erstellung des Textes aktuellen Stand wieder und stellen eine individuelle Auftragsarbeit für einen Abgeordneten des Bundestages dar. Die Arbeiten können der Geheimschutzordnung des Bundestages unterliegende, geschützte oder andere nicht zur Veröffentlichung geeignete Informationen enthalten. Eine beabsichtigte Weitergabe oder Veröffentlichung ist vorab dem jeweiligen Fachbereich anzuzeigen und nur mit Angabe der Quelle zulässig. Der Fachbereich berät über die dabei zu berücksichtigenden Fragen.

Inhaltsverzeichnis

1.	Einleitung	4
2.	Fahrzeugaufbau mit elektrifizierten Antrieben	4
3.	Die Verbreitung von elektrifizierten Fahrzeugen	6
4.	Umstellung des Automobilssektors auf elektrifizierte Fahrzeuge	9
5.	Plug-In-Hybridfahrzeuge	10
5.1.	Derzeitige Diskussion zur Förderung von PHEV	10
5.2.	Verbreitung speziell von Hybrid-Fahrzeugen	12
6.	Emissionsausstoß- und Wirtschaftlichkeitsberechnung von elektrifizierten Fahrzeugen	14
6.1.	Emissionsausstoß und CO ₂ -Vermeidungskosten	14
6.2.	Berechnung der CO ₂ -Emissionen	15
6.2.1.	Zyklusbetrachtung der anfallenden Emissionen	15
6.2.2.	Verbrauchsbestimmung in der Nutzungsphase	17
6.2.3.	Nutzerbasierte Verbrauchsbestimmung speziell bei PHEV (Utility Factor)	18
6.3.	Berechnung der CO ₂ -Vermeidungskosten	19
7.	Stand der Wissenschaft	20
7.1.	CO ₂ -Emissionen: Fraunhofer ISI und ICCT (2022)	20
7.2.	CO ₂ -Emissionen: Buberger et al. (2022)	22
7.3.	CO ₂ -Emissionen: Zapf et al. (2021)	24
7.4.	CO ₂ -Emissionen: Hirz, Nguyen (2022)	25
7.5.	CO ₂ -Emissionen: Jöhrens, et al. (2020)	28
7.6.	CO ₂ -Emissionen: Agora Verkehrswende (2019)	30
7.7.	CO ₂ -Emissionen: Volvo – Carbon footprint report C40	33
7.8.	CO ₂ -Emissionen: Philippot et al. (2019)	35
7.9.	CO ₂ -Emissionen: Buchal et al. (2019)	36
7.10.	CO ₂ -Vermeidungskosten: Zapf et al. (2021)	37
7.11.	CO ₂ -Vermeidungskosten: Institut der deutschen Wirtschaft (2019)	39
7.12.	CO ₂ -Vermeidungskosten: Deutsche Bank Research (2021)	39
8.	Schlussbetrachtung	39

1. Einleitung

Der Ausstoß von CO₂¹ ist mittlerweile zur wichtigsten Kennzahl auf dem Weg zur klimaneutralen Gesellschaft geworden. Um den Verkehrssektor klimaneutral zu gestalten, wurde der Kauf von Fahrzeugen mit Elektroantrieb in Deutschland durch das Programm „Förderung des Absatzes von elektrisch betriebenen Fahrzeugen (Umweltbonus)“ gefördert.² Die Förderung umfasst sowohl reine Elektrofahrzeuge (**BEV** – Battery Electric Vehicle) als auch Plug-In Hybrid Autos (**PHEV** – Plug-In Hybrid Vehicle). Nicht zuletzt durch diese Förderung ist der Anteil von Elektroautos bei den Neuzulassungen zuletzt merklich auf 13,6 (BEV) bzw. 12,4 (PHEV) Prozent gestiegen.³

Die Transformation wird stark von der Diskussion bestimmt, inwieweit BEV und PHEV weniger CO₂ ausstoßen als Fahrzeuge mit Verbrennermotor und welche Kosten mit dem geringeren Ausstoß verbunden sind. Diese Dokumentation untersucht die aktuelle Studienlage zum **Emissionsausstoß** von BEV und speziell von PHEV gegenüber Verbrennern sowie zu den **CO₂-Vermeidungskosten**, sowie die dafür relevanten **Einflussfaktoren**.

2. Fahrzeugaufbau mit elektrifizierten Antrieben

Äußerlich unterscheiden sich elektrifizierte Fahrzeuge (darunter werden BEV und PHEV zusammengefasst) wenig von den bisherigen Benzin- und Dieselfahrzeugen. Jedoch haben elektrifizierte Antriebe einen völlig anderen Aufbau als Verbrennungsmotoren. Die Gruppe der elektrifizierten Fahrzeuge umfasst sowohl BEV als auch verschiedene Ausführungen von Hybriden (siehe Abbildung 1). Es gibt grundlegend zwei Hybrid-Typen (zusätzlich gibt es noch weitere, feine technische Abstufungen⁴). **Hybride ohne externe Lademöglichkeit** am Fahrzeug besitzen meist kleine Batterien, die durch Überschussenergie des Motors oder durch Rückgewinnung der Bremsenergie (Rekuperation) aufgeladen werden. Der Elektromotor unterstützt das Anfahren, wodurch Kraftstoff eingespart wird. Allerdings können Strecken nicht rein elektrisch zurückgelegt werden. Ein anderes Konzept verfolgt der **Plug-In Hybrid**.

1 Der CO₂-Ausstoß ist ein zusammenfassender Begriff und beschreibt auch **CO₂-Äquivalente** (CO₂äq), unter den die treibhauswirksamen Gase Kohlendioxid (CO₂), Methan (CH₄) und Distickstoff-Monoxid (N₂O) fallen. Der Lesbarkeit halber wird auf CO₂-Emissionen Bezug genommen.

2 Wissenschaftliche Dienste (2022), Förderung von Elektroautos, WD 5 - 3000 - 022/22, <https://www.bundestag.de/resource/blob/889154/aef2c470cf2ede6d4312d792d8426f54/WD-5-022-22-pdf-data.pdf>.

3 <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/699301/umfrage/anteil-von-kraftstoffarten-an-neuzulassungen-von-pkw-in-deutschland/>.

4 Für eine Erläuterung weiterer Hybrid-Typen siehe z. B. <https://www.toyota.de/elektromobilitaet/hybrid/so-funktioniert-hybrid>.

- „(...) PHEV sind Fahrzeuge, die sowohl über einen Verbrennungsmotor als auch über einen Elektromotor angetrieben werden können. Sie verfügen über eine extern aufladbare Batterie. Die Batteriekapazität von PHEV ist zudem deutlich größer als bei einfachen Hybridfahrzeugen, was die elektrische Reichweite deutlich erhöht.“⁵

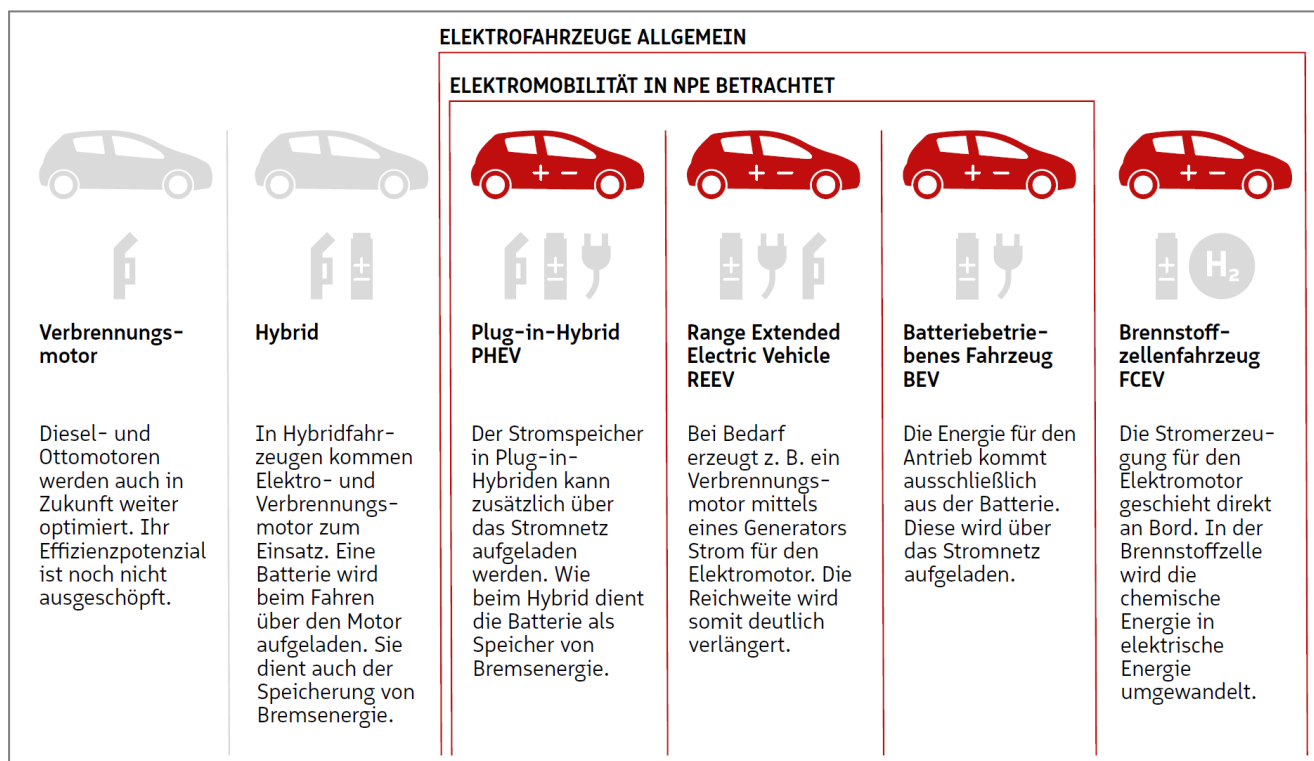


Abbildung 1: Übersicht der Antriebstechnologien⁶

Was BEV und PHEV von reinen Verbrennern unterscheidet ist der Antriebsstrang und das zusätzliche Gewicht des verbauten Akkus. Beides wirkt sich auf die Fahreigenschaften aus. Zudem verändern vor allem bei BEV die höhere Energieeffizienz in der Kraftumsetzung (direktere Verfügbarkeit von Bewegungsenergie) sowie die verringerte Geräuschentwicklung durch fehlende mechanische Bewegungen und Schwingungen das subjektive Fahrgefühl des Fahrzeugs (schnellere Beschleunigung, mehr Komfort).⁷

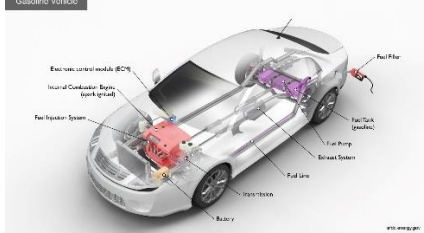
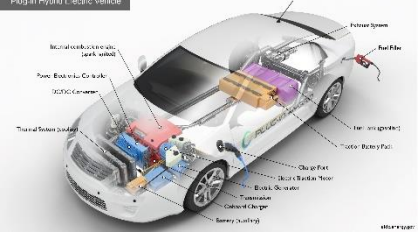
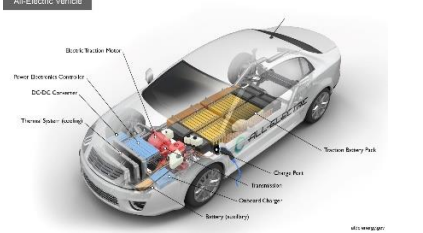
5 NPM (2020), Empfehlungen zum optimalen Nutzungsgrad von Plug-In-Hybridfahrzeugen, <https://www.plattform-zukunft-mobilitaet.de/wp-content/uploads/2020/10/NPM-Empfehlungen-zum-optimierten-Nutzungsgrad-von-Plug-in-Hybridfahrzeugen.pdf>, S. 5.

6 NPE (2012): Fortschrittsbericht der Nationalen Plattform Elektromobilität, https://www.plattform-zukunft-mobilitaet.de/wp-content/uploads/2021/12/2012_NPE_Fortschrittsbericht.pdf, S. 7.

7 Wissenschaftliche Dienste (2022), Auswirkungen der Elektromobilität auf die Kautschukindustrie, WD 5 - 3000 - 061/22.

Eine Übersicht, wie sich die Antriebe eines Verbrennermotors, eines PHEV und eines BEV technisch unterscheiden, ist visuell in Tabelle 1 verlinkt und bei der jeweiligen Quelle detailliert beschrieben (hochauflösende Bilder als Link).

Tabelle 1: Funktionsweisen von verschiedenen Antriebstechniken in Fahrzeugen (zum Vergrößern auf das Bild klicken)

Verbrennermotor	Plug-In Hybrid	Elektromotor
 <p>Labels: Gasoline Vehicle, Fuel Filter, Fuel Tank (gasoline), Fuel Pump, Intake System, Exhaust System, Spark Plugs, Ignition System, Piston and Crankshaft, Electric control module (ECM), Fuel Injector, Fuel Line, Transmission, Battery.</p>	 <p>Labels: Plug-in Hybrid Electric Vehicle, Fuel Filter, Fuel Tank, Electric Motor, Battery Pack, Transmission, Clutch, Drive Shaft, Torque Converter, Piston and Crankshaft, Intake System, Exhaust System, Spark Plugs, Ignition System, Piston and Crankshaft, Electric control module (ECM), Fuel Injector, Fuel Line, Transmission, Battery, Battery Pack, Charge Port, DC-DC Converter, Power Electronics Controller, Thermal Solar Insulation, Torque Sensor, Battery Pack, Charge Port, Transmission, On-board Charger, Battery (auxiliary).</p>	 <p>Labels: All-Electric Vehicle, Block Heater Plug, Power Electronics Controller, DC-DC Converter, Thermal Solar Insulation, Torque Sensor, Battery Pack, Charge Port, Transmission, On-board Charger, Battery (auxiliary).</p>
<p>https://afdc.energy.gov/vehicles/how-do-gasoline-cars-work</p>	<p>https://afdc.energy.gov/vehicles/how-do-plug-in-hybrid-electric-cars-work</p>	<p>https://afdc.energy.gov/vehicles/how-do-all-electric-cars-work</p>

3. Die Verbreitung von elektrifizierten Fahrzeugen

Der Anteil von Elektroautos und Hybriden am Gesamt-PKW-Bestand beträgt **2,6 Prozent**.⁸ Der Anteil bei den neu zugelassenen PKW betrug 2021 13,6 (BEV) bzw. 12,4 (PHEV) Prozent (siehe Abbildung 2). Ein Grund für die verstärkte Nachfrage ist das Förderprogramm des Bundes⁹, über das bisher die Anschaffung von 1.270.000 Fahrzeugen gefördert wurde (ca. 710.000 BEV und 555.000 PHEV) (Stand Juni 2022).¹⁰

8 <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/784986/umfrage/marktanteil-von-elektrofahrzeugen-in-deutschland/>.

9 Zum Förderprogramm siehe Wissenschaftliche Dienste (2022), Förderung von Elektroautos, Sachstand WD 5 – 022/22, <https://www.bundestag.de/resource/blob/889154/aeef2c470cf2ede6d4312d792d8426f54/WD-5-022-22-pdf-data.pdf>.

10 Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle (2022), Elektromobilität (Umweltbonus) – Zwischenbilanz zum Antragstand vom 1. Juni 2022, https://www.bafa.de/SharedDocs/Downloads/DE/Energie/emob_zwischenbilanz.pdf?__blob=publicationFile&v=17.

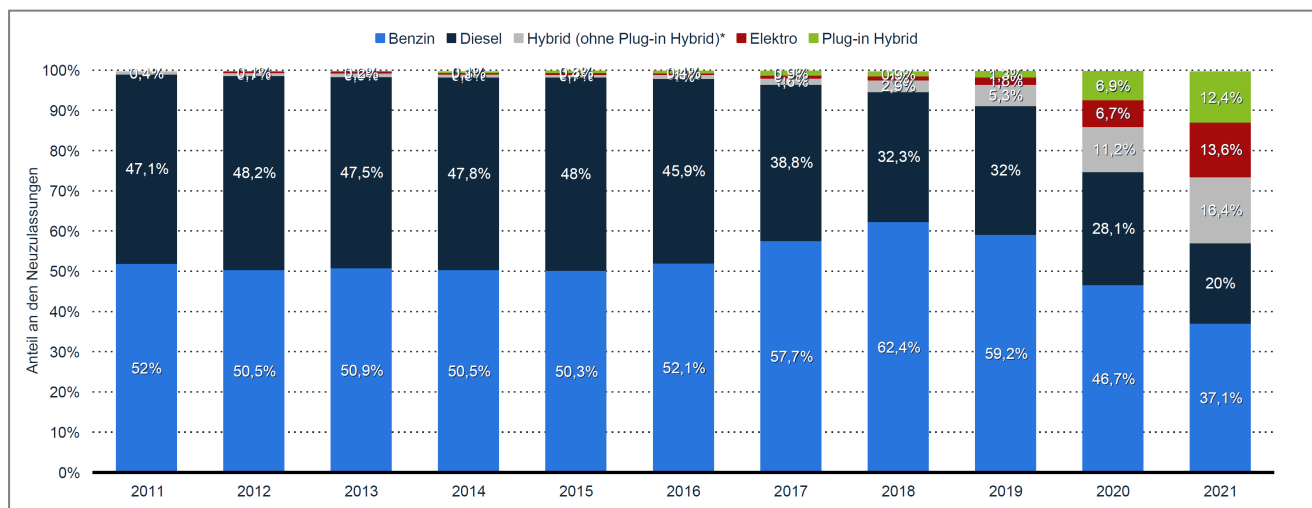


Abbildung 2: Anteil ausgewählter Kraftstoffarten an den Neuzulassungen von Personenkraftwagen in Deutschland von 2011 bis 2021¹¹

Zur weltweiten Absatzentwicklung von BEV und PHEV siehe:

- IEA (2022), Global Electric Vehicle Outlook, <https://iea.blob.core.windows.net/assets/e0d2081d-487d-4818-8c59-69b638969f9e/GlobalElectricVehicleOutlook2022.pdf>, S. 13-33.

Mit Blick auf die ambitionierten Klimaziele in Deutschland und in der EU, wird zukünftig von einer steigenden Anzahl von elektrifizierten Fahrzeugen ausgegangen. Auflagen sehen vor, dass der CO₂-Ausstoß von Fahrzeugen stark reduziert wird.¹² Dementsprechend sagen unterschiedliche Prognosen einen hohen Anteil an Elektrofahrzeugen voraus (siehe Abbildung 3 und Abbildung 4).

¹¹ <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/699301/umfrage/anteil-von-kraftstoffarten-an-neuzulassungen-von-pkw-in-deutschland/>.

¹² https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/de/ip_21_3541, <https://www.bmvv.de/pressemitteilung/eu-umweltrat-deutschland-unterstuetzt-verbrenner-aus-ab-2035>.

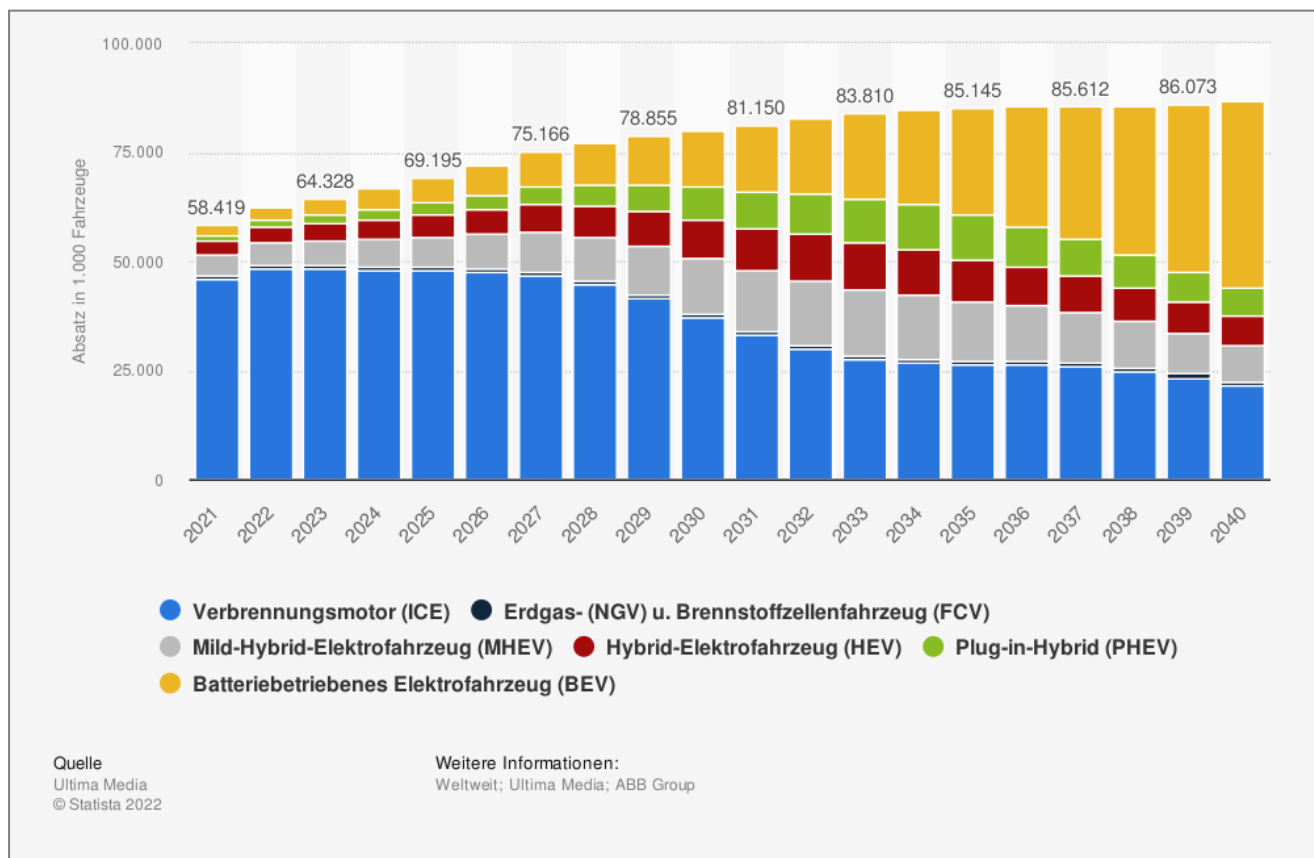


Abbildung 3: Prognostizierter Absatz von Personenkraftwagen weltweit nach Antrieb von 2021 bis 2040 (in 1.000 Fahrzeugen)¹³

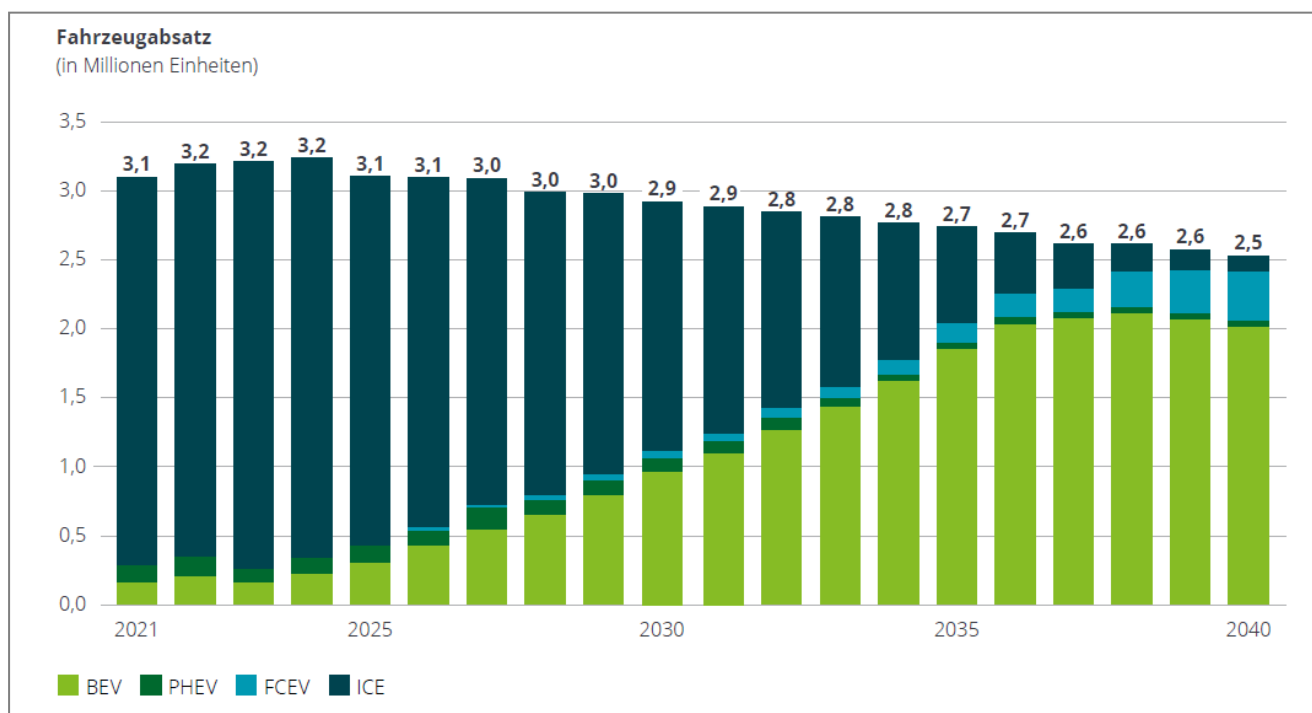


Abbildung 4: Ausblick zur Zusammensetzung des Fahrzeugabsatzes in Deutschland bis 2040 (absolute Entwicklung in Deutschland)¹⁴ (Erläuterung: FCEV - Fuel Cell Electric Vehicle, ICE - Internal Combustion Engine)

4. Umstellung des Automobilsektors auf elektrifizierte Fahrzeuge

Auf Seiten der Automobilhersteller, die derzeit von Lieferkettenproblemen und den verschärften Preisdruck von Materialien und Energie betroffen sind, ist die Wirtschaftlichkeit der BEV-Produktion eine entscheidende Zukunftsfrage.¹⁵ Die reduzierte Komponentenanzahl eines elektrifizierten Antriebsstrangs führt zu schlankeren Wertschöpfungsketten und einer geringeren Anzahl an Zulieferteilen.¹⁶ Ca. 30.000 Autoteile sind in einem Verbrenner verbaut. Eine elektrische Version desselben Fahrzeugtyps würde schätzungsweise 15.000 Teile davon nicht mehr benötigen. Dies schlägt sich direkt in der Produktion von elektrifizierten Fahrzeugen und damit in der Beschäftigung bei Produzenten und Zulieferern nieder. Waren vorher die Antriebe der Verbrenner ein wesentlicher Teil der Wertschöpfung, verschiebt sich diese bei der Produktion von E-Autos hin zur Batterieproduktion, dem Design und dem effizienten Zusammensetzen (Assembling). Dennoch

14 Deloitte (2020): Elektromobilität in Deutschland, Marktentwicklung bis 2030 und Handlungsempfehlungen, https://www2.deloitte.com/content/dam/Deloitte/de/Documents/consumer-industrial-products/elektromobilitaet-in-deutschland_deloitte.pdf, S. 16.

15 Handelsblatt (2022), Der absehbare Tod der Plug-in-Hybride, <https://www.handelsblatt.com/unternehmen/industrie/elektromobilitaet-der-absehbare-tod-der-plug-in-hybride/28402696.html?dicbo=v2-40362078b5f55035f14c468d7eb127cd>.

16 Siehe im Folgenden Wissenschaftliche Dienste (2022), Auswirkungen der Elektromobilität auf die Kautschukindustrie, WD 5 - 3000 - 061/22.

sei die Produktionsumstellung für die traditionellen Automobilunternehmen herausfordernd.¹⁷ Die Umstellung auf E-Fahrzeuge ist für die Branche der Anlass, massive Produktivitätssteigerungen zu realisieren, um die Kosten der E-Auto-Produktion zu senken, um die Querfinanzierung aus dem Verbrennergeschäft zu reduzieren.¹⁸ Es wird versucht die reine Produktionszeit für ein BEV stark zu verkürzen und zum angeblichen Effizienzführer Tesla aufzuschließen, die nach Analystenaussage bei 10 Stunden liegen könne – Branchenstandard bei Verbrennerfahrzeugen sei ungefähr das Doppelte.¹⁹ Eine solche Produktivitätssteigerung würde sich auch auf den CO₂-Abdruck auswirken.

5. Plug-In-Hybridfahrzeuge

5.1. Derzeitige Diskussion zur Förderung von PHEV

Generell gilt bei einem Vergleich von einem Kernprodukt mit einem Hybridprodukt, dass aufgrund seiner Natur der Hybrid meistens in mehreren Leistungsdimensionen moderat abschneidet und damit breiter für unterschiedliche Nutzungsszenarien oder Anforderungen aufgestellt ist als das Vergleichsobjekt, das in einzelnen Leistungsdimensionen große Vorsprünge hat. In der entscheidenden Leistungsdimension „Emissionen“ können PHEV je nach Nutzung und Fahrzeugklasse weniger CO₂ emittieren als Verbrenner, jedoch produzieren sie mehr CO₂ als BEV (siehe Kapitel 7).

PHEV haben einen schlechten Ruf, was die CO₂-Bilanz angeht. Grund dafür sind u. a. SUV-Modelle als PHEV-Versionen, die große Massen bewegen aber verhältnismäßig kleine E-Motoren besitzen und daher oft parallel mit Verbrennermotoren laufen.²⁰ Weitere Kritik an PHEV fußt aus dem Umstand, dass PHEV zu großen Teilen von Unternehmen aufgrund des halbierten Steuersatzes für den geldwerten Vorteil der Fahrzeugnutzung angeschafft wurden. Fahrzeuge für den Flotteneinsatz in Unternehmen werden jedoch meistens für längere Wegstrecken beschafft. PHEV mit ihrem begrenzten rein-elektrischen Fahrtenanteil passen jedoch nicht ganz zum Nutzungsprofil und werden eher im Verbrenner-Modus gefahren.²¹

In der konsumentenorientierten Fachpresse wird jedoch darauf hingewiesen, dass sich einige Vorurteile in der Praxis nicht bestätigen bzw. nicht generalisieren.²²

17 https://efahrer.chip.de/news/knackt-vw-jetzt-tesla-musks-und-diess-strategien-im-vergleich_108337

18 <https://www.derstandard.de/story/2000134559396/so-will-vw-den-tesla-erfolg-kopieren>

19 https://efahrer.chip.de/news/vw-will-e-autos-im-tesla-tempo-bauen-jetzt-schreitet-der-betriebsrat-ein_108139

20 Transport & Environment (2020). A new Dieselgate in the making, https://www.duh.de/fileadmin/user_upload/download/Pressemitteilungen/Verkehr/T E/2020_11 Plug-in hybrids report final.pdf.

21 <https://www.mobilitaetsverband.de/news-detail/plug-in-hybride-foerderung-nur-fuer-stromtanken.html>.

22 <https://www.auto-motor-und-sport.de/tech-zukunft/alternative-antriebe/die-10-groesten-plugin-hybrid-irrtue-mer-report/>.

Die Vereinigung „Nationale Plattform Zukunft der Mobilität“ äußerte sich 2020 zu PHEV und deren Rolle in der Elektrifizierung der Verkehrswende positiv. Dabei ging es einerseits um das Heranführen der Autofahrer an das elektrische Fahren und andererseits um die Verzögerung von Arbeitsmarkteffekten, da BEV weniger personalintensiv in der Produktion seien als Verbrenner und Hybride.

- NPM (2020), Empfehlungen zum optimalen Nutzungsgrad von Plug-In-Hybridfahrzeugen, <https://www.plattform-zukunft-mobilitaet.de/wp-content/uploads/2020/10/NPM-Empfehlungen-zum-optimierten-Nutzungsgrad-von-Plug-in-Hybridfahrzeugen.pdf>.

Hingegen weist eine Studie des ifeu (Institute for Energy and Environmental Research Heidelberg) auf den fehlenden ökologischen Nutzen von PHEV und diverse Nachteile hin. Darunter zählen die überdurchschnittlich hohe Fahrzeugmasse, wesentliche Abweichungen der Realverbräuche durch den höheren Anteil, der mit Kraftstoff statt mit dem Elektroantrieb gefahren wird, sowie die geringe Motorleistung des E-Antriebs, welcher der Grund sei, weswegen PHEV weniger rein elektrisch gefahren werden. Die Autoren sprechen sich gegen eine weitere Förderung von PHEV aus.

- Jöhrens et al. (2020), Plug-in hybrid electric cars: Market development, technical analysis and CO₂ emission scenarios for Germany, Study on behalf of the German Federal Ministry for the Environment, Nature Conservation and Nuclear Safety, <https://www.oeko.de/uploads/oeko/oekodoc/PHEV-Report-Market-Technology-CO2.pdf>.

Ebenfalls kritisch äußern sich Bieker et al. (2022) bei einem Vergleich der Treibhausgasemissionen (THG) von BEV und PHEV und der aktuellen Förderung in Deutschland. Demnach ist die Varianz des Ausstoßes bei PHEV wesentlich höher (10 %–52 % geringere THG-Emissionen als Benzin) als bei BEV (haben 57 %–67 % geringere THG-Emissionen als Benzin). Das Verhältnis von CO₂-Einsparung pro 1000 Euro Förderung fällt für BEV positiver aus. Die Autoren fordern eine Kürzung der Fördersumme für PHEV um 2500 Euro und sowie Nutzungsnachweise der Halter.

- Bieker et al. (2022), More bang for the buck: A comparison of the life-cycle GHG emission benefits and incentives of plug-in hybrid and battery electric vehicles in Germany, <https://theicct.org/wp-content/uploads/2022/03/ghg-benefits-incentives-ev-mar22.pdf>.

Im Zuge der schnelleren Marktdurchdringung von BEV und der abnehmenden „Reichweitenangst“ der Autofahrer ist die Kritik an der Förderung von PHEV zunehmend lauter geworden. Politiker und Experten lassen offen, ob PHEV über das Jahr 2023 gefördert werden sollten.²³ Hinzu kommen das geringer werdende Interesse der Automobilhersteller aufgrund geringerer Margen und einer vergleichsweise hohen Komplexität bei der PHEV-Produktion.

23 <https://www.manager-magazin.de/politik/deutschland/plug-in-hybride-zuschuesse-sollen-schon-ende-2022-auslaufen-a-2e3505a6-1ebf-468d-b7a8-a38f9ebf9e39>.

- Handelsblatt (2022), Der absehbare Tod der Plug-in-Hybride, <https://www.handelsblatt.com/unternehmen/industrie/elektromobilitaet-der-absehbare-tod-der-plug-in-hybrid/28402696.html?dicbo=v2-40362078b5f55035f14c468d7eb127cd>.

5.2. Verbreitung speziell von Hybrid-Fahrzeugen

Es wird erwartet, dass kurz- bis mittelfristig Elektro-Hybrid-Fahrzeuge als Brückentechnologie genutzt werden, bevor sich im Zuge technologischer Weiterentwicklung und des Ladeinfrastrukturausbau Fahrzeuge mit elektrischen Antrieben zunehmend durchsetzen.²⁴ Nach Aussagen von Experten scheint sich diese Zeitspanne mit Blick auf die aktuellen Zulassungszahlen zu verkürzen.

Abbildung 5 zeigt, dass in den zurück liegenden Monaten die Neuzulassungen von PHEV (gelbe Linie) oftmals unter denen reiner Elektroautos (lila Linie) lagen, wohingegen der Anteil von Hybrid-Fahrzeugen ohne externe Lademöglichkeit (grüne Linie) immer noch recht hoch war. Da diese jedoch keine reinen elektrischen Wegstrecken zurück legen können (siehe Abbildung 1), werden jedoch nicht gefördert.

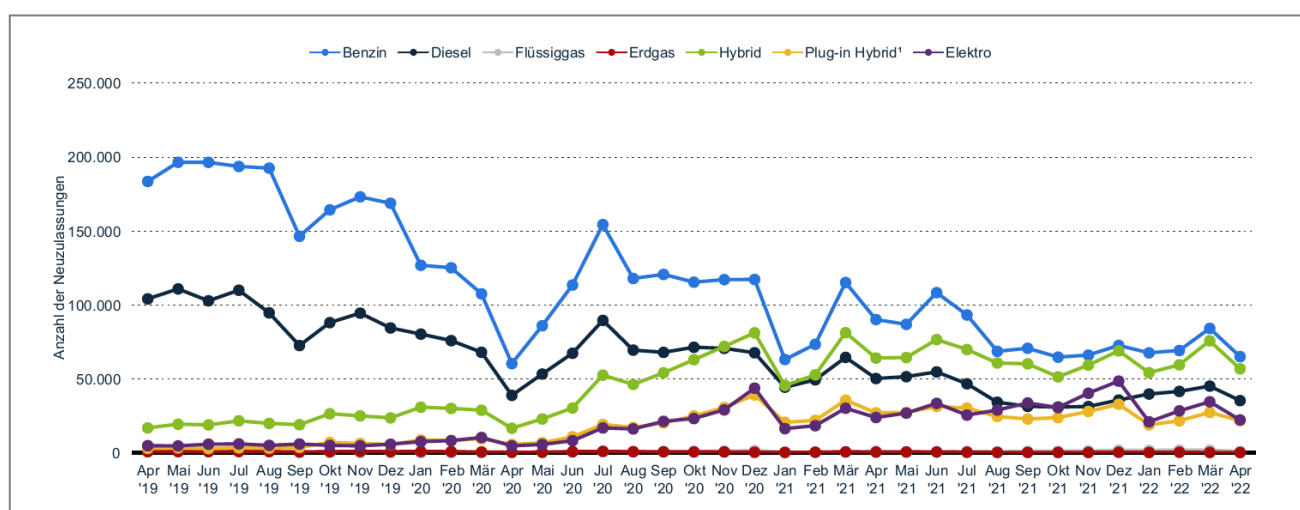


Abbildung 5: Anzahl der Neuzulassungen von PKW in Deutschland nach Kraftstoffarten²⁵

Im Jahr 2022 war ein Großteil der PHEV von gewerblichen Haltern angemeldet worden, während BEV überwiegend von privaten Haltern angemeldet wurden (siehe Abbildung 6). Die Zulassungsdaten zeigen, dass gemessen an der Gesamtanzahl aller zugelassenen Fahrzeuge (alle Antriebe) der Anteil an PHEV bei gewerblichen Haltern 2021 und 2022 deutlich zugelegt hat (siehe Tabelle 2).

²⁴ Deloitte (2020): Elektromobilität in Deutschland, Marktentwicklung bis 2030 und Handlungsempfehlungen, https://www2.deloitte.com/content/dam/Deloitte/de/Documents/consumer-industrial-products/elektromobilitaet-in-deutschland_deloitte.pdf, S. 7.

²⁵ <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/203471/umfrage/monatliche-pkw-neuzulassungen-in-deutschland-nach-kraftstoffarten/>.

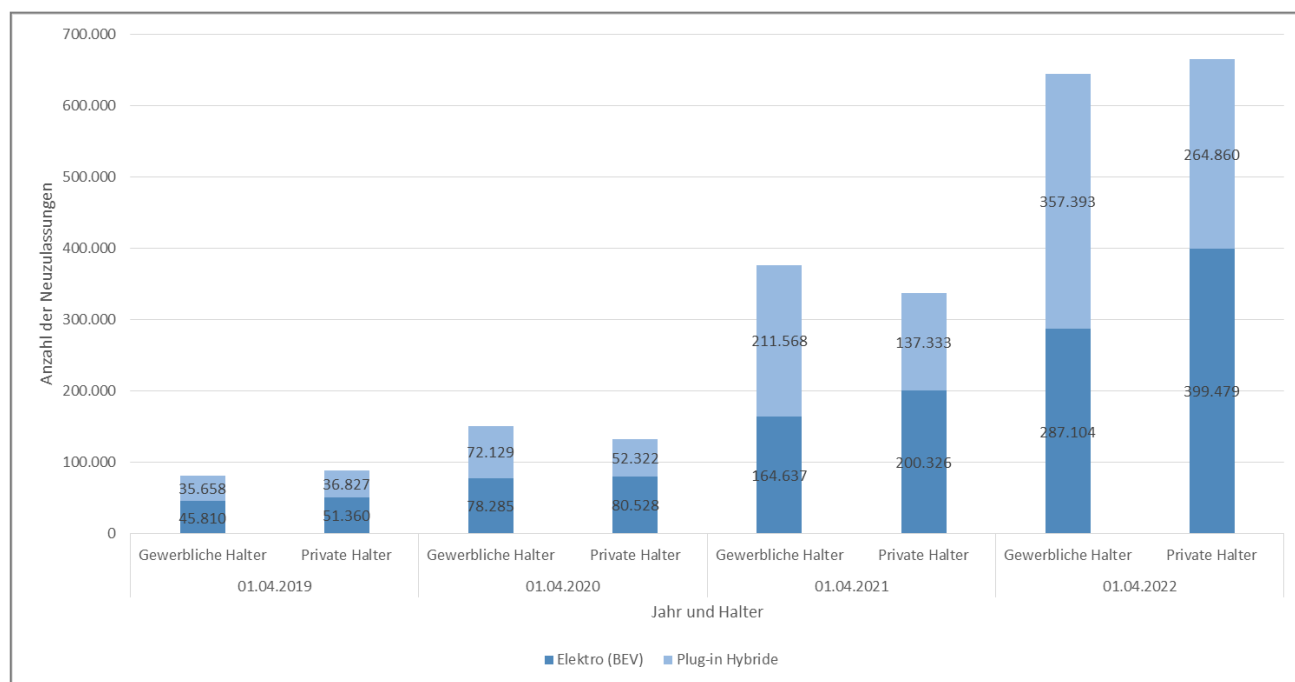


Abbildung 6: Verteilung der Neuzulassung von BEV und PHEV nach Fahrzeughaltern in Deutschland 2019-2022²⁶

26 Eigene Darstellung mit Daten des Kraftfahrtbundesamts (KBA), https://www.kba.de/DE/Statistik/Fahrzeuge/Bestand/Umwelt/umwelt_node.html.

Tabelle 2: Verteilung der Neuzulassungen von PKW nach Fahrzeughaltern und Antrieben in Deutschland 2019-2022²⁷

	Halter- gruppe	Benzin		Gas ins- gesamt	Elektro (BEV)	Hybrid insge- samt	Plug-in Hybride	Sonstige	PKW ins- gesamt
01.04.2019	Gewerbli- che Halter	1.871.252	3.071.952	30.381	45.810	115.511	35.658	789	5.135.695
	Private Hal- ter	29.323.521	12.064.288	440.170	51.360	266.469	36.827	9.581	42.155.389
01.04.2020	Gewerbli- che Halter	1.900.073	2.920.243	29.880	78.285	229.363	72.129	859	5.158.703
	Private Hal- ter	29.543.263	12.137.219	415.923	80.528	382.817	52.322	9.334	42.569.084
01.04.2021	Gewerbli- che Halter	1.781.603	2.679.974	28.039	164.637	502.731	211.568	1.069	5.158.053
	Private Hal- ter	29.558.245	12.316.345	395.891	200.326	655.217	137.333	9.066	43.135.090
01.04.2022	Gewerbli- che Halter	1.709.898	2.471.846	26.734	287.104	776.155	357.393	1.316	5.273.053
	Private Hal- ter	29.158.461	12.268.113	387.028	399.479	1.051.383	264.860	8.846	43.273.310

6. Emissionsausstoß- und Wirtschaftlichkeitsberechnung von elektrifizierten Fahrzeugen

6.1. Emissionsausstoß und CO₂-Vermeidungskosten

Der Ausstoß von CO₂-Emissionen für Fahrzeuge kann auf technische und wirtschaftliche Weise betrachtet werden. Zum einen wird der CO₂-Fußabdruck in Form der **CO₂-Emissionen** des Fahrzeugs berechnet (siehe Kapitel 6.2). Dies umfasst alle Emissionen, die in den verschiedenen Lebenszyklen des Fahrzeugs (benötigte Rohstoffe und Produktion, Nutzung und End-Of-Life/Recycling) aber auch Herstellung und Verteilung von Kraftstoffen oder Strom anfallen. Werden diese Ausstöße erfasst, können typen- oder antriebsspezifische Vergleiche vorgenommen werden, inwiefern elektrifizierte Fahrzeuge im Gegensatz zu Verbrennermotoren unterschiedliche CO₂-Ausstöße produzieren. Dabei wird die Lebensfahrleistung des Fahrzeugs zugrunde gelegt. Dem-

²⁷ Eigene Darstellung mit Daten des Kraftfahrtbundesamts (KBA), https://www.kba.de/DE/Statistik/Fahrzeuge/Bestand/Umwelt/umwelt_node.html.

entsprechend können die Gesamtemissionen oder Verbrauchsemissionen in g/km ermittelt werden. Daraus lassen sich Schlüsse zum technologischen Unterschied oder Fortschritt bei den Antrieben und den Produktionsbedingungen ziehen. Ziel ist dabei das Emissions-Monitoring und die Einhaltung vorgegebener Standards oder Zielsetzungen.

In einem weiteren Schritt werden die eingesparten Emissionen ins Verhältnis zu den eingesetzten Kosten gesetzt. Mit den sogenannten **CO₂-Vermeidungskosten-Ansatz** wird allgemein die Effizienz zweier vergleichender Maßnahmen oder Alternativen beschrieben (siehe Kapitel 6.3). Ziel ist es nicht, die Alternative auszuwählen, die am meisten CO₂ einspart, sondern die Maßnahme zu identifizieren, die das günstigste Verhältnis zwischen Kosten und eingesparter Tonne CO₂ aufweist („Best Value for Money“-Ansatz).

6.2. Berechnung der CO₂-Emissionen

6.2.1. Zyklusbetrachtung der anfallenden Emissionen

Bei der Berechnung von CO₂-Emissionen geht es darum, möglichst umfassend den gesamten Lebenszyklus, d. h. die Produktion (einschließlich Gewinnung der Rohstoffe), die Nutzungsphase und das Recycling des Fahrzeugs zu erfassen (siehe Abbildung 7).

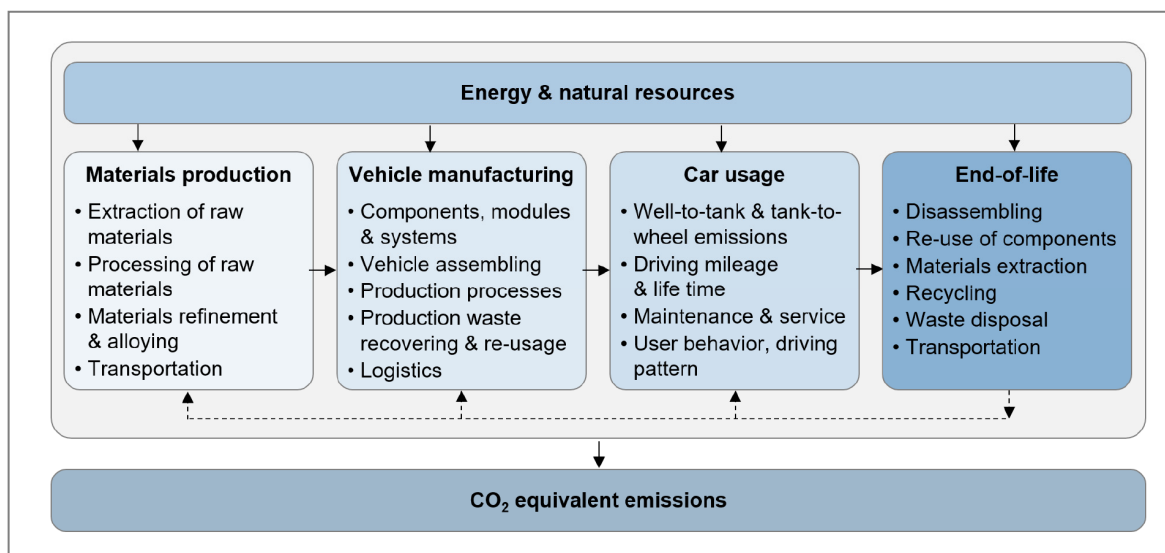


Abbildung 7: Main phases and influencing factors of a CO₂ equivalent-emissions-focused automotive LCA²⁸

Folgende Zyklusbetrachtungen des CO₂-Ausstoßes werden in den Studien zur Verbrauchs- und Emissionsbestimmung genutzt (siehe Abbildung 8):

- CO₂-Kraftstoffbereitstellung/Strombereitstellung (Well-to-Tank = WtT)

28 Hirz, M.; Nguyen, T.T. Life-Cycle CO₂-Equivalent Emissions of Cars Driven by Conventional and Electric Propulsion Systems. *World Electr. Veh. J.* 2022, 13, 61. <https://doi.org/10.3390/wevj13040061>, S. 3.

- CO2-Verbrauch beim Fahren (Tank-to-Wheel = TtW)
- CO2-Gesamtnutzungsverbrauch (Well-to-Wheel = WtW)
- CO2-Ausstoß bei Produktion und Recycling

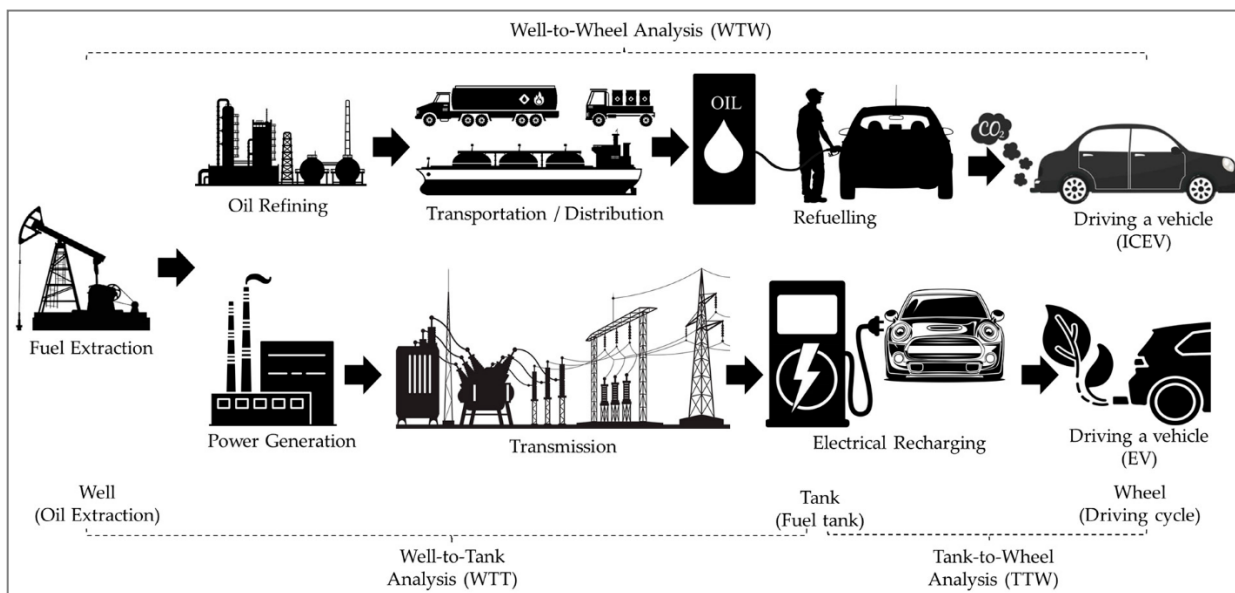


Abbildung 8: Lebenszyklusgrenzen der Nutzungsphase (Fahrzeugproduktion und -recycling nicht inbegriffen)²⁹

Werden die Emissionen auf die Lebenszyklen unterschiedlicher Antriebstypen aufgeteilt, entstehen anschauliche Klimabilanz-Vergleiche (siehe illustrativ Abbildung 9).

29 Al-Buenain, Ahmad, Saeed Al-Muhannadi, Mohammad Falamarzi, Adeeb A. Kutty, Murat Kucukvar, and Nuri C. Onat (2021), "The Adoption of Electric Vehicles in Qatar Can Contribute to Net Carbon Emission Reduction but Requires Strong Government Incentives" *Vehicles* 3, no. 3: 618-635. <https://doi.org/10.3390/vehicles3030037>.

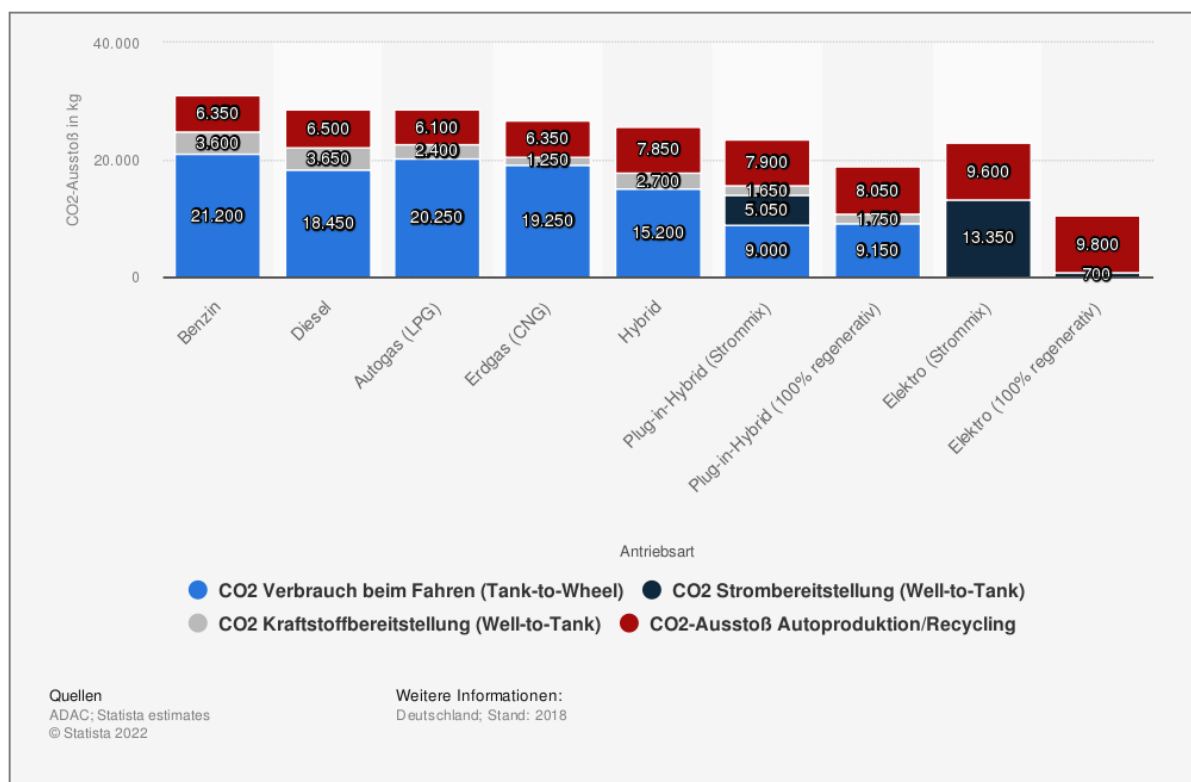


Abbildung 9: Klimabilanz von Fahrzeugen der unteren Mittelklasse nach Antriebsart und Zeitpunkt des CO₂-Ausstoßes in Deutschland im Jahr 2018 (in Kilogramm)³⁰

6.2.2. Verbrauchsbestimmung in der Nutzungsphase

Eine wesentliche Herausforderung bei der CO₂-Emissionsberechnung von Fahrzeugen ist die Bestimmung des Verbrauchs von Kraftstoff oder Strom während der Nutzungszeit.

Der 1992 eingeführte **Neure Europäische Fahrzyklus (NEFZ)** galt für alle in der EU zugelassenen Neufahrzeuge. Hierbei absolvierte das Testfahrzeug einen genau definierten „Kurs“ im Testlabor: Es werden 11 km Strecke innerhalb von 20 Minuten simuliert; dem Testfahrer wird dabei genau vorgegeben, wie er das Fahrzeug zu bewegen hat. Die Simulation erfolgt in zwei unterschiedlichen Zyklen, einem Stadtzyklus (Durchschnittsgeschwindigkeit: 34 km/h) und einer kurzen Autobahnfahrt (Höchstgeschwindigkeit: 120 km/h).³¹ Der NEFZ wird nur bedingt als realistisch eingeschätzt.

30 <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/820898/umfrage/co2-ausstoss-von-kompaktwagen-nach-antriebsart-in-deutschland/>, Die LCA-Studie des ADAC ist in diese Analyse nicht eingeflossen, da der ADAC eine Aktualisierung der Daten von 2018 plant und die hier vorgestellten Werte keine aktuelle Aussagekraft besitzen. Eine neue Studie ist für Mitte 2022 angekündigt (<https://www.adac.de/verkehr/tanken-kraftstoff-antrieb/alternative-antriebe/klimabilanz/>).

31 <https://www.adac.de/verkehr/abgas-diesel-fahrverbote/abgasnorm/wltp-messverfahren/>.

Der NEFZ wurde zum 1. September 2017 durch die **Worldwide Harmonized Light Vehicles Test Procedure (WLTP)** und den dazugehörigen **Worldwide Harmonized Light Duty Test Cycle (WLTC)** abgelöst. Die WLTP besteht aus deutlich mehr Einzelzyklen, die in Abhängigkeit neu eingeführter Fahrzeugklassen angewendet werden. Statt lediglich 11 km Strecke werden nun 23,25 km Strecke simuliert; hierfür stehen 30 anstatt 20 Minuten zu Verfügung. Während des Tests beträgt die Durchschnittsgeschwindigkeit nun 46,5 km/h und die Höchstgeschwindigkeit 131 km/h. Auch wird dem Testfahrer bei diesem Test nicht mehr genau vorgegeben, wie und wann er das Fahrzeug zu bewegen hat. Hierdurch sollen deutlich realistischere Werte erzielt werden als beim sehr statischen Labortest des überholten NEFZ.³²

Noch genauere Verbrauchs- und Emissionswerte liefert der **vom ADAC 2003 entwickelte Eco-Test**.³³ Dieser wird fortlaufend angepasst und kombiniert den aktuellsten Prüfstandard (**WLTC 5.3**) mit einem eigens entwickelten, **zusätzlichen Autobahntest** unter realen Fahrbedingungen. Hierdurch soll überprüft werden, ob die Abgasnachbehandlungssysteme auch außerhalb der gesetzlichen Testgrenzen korrekt arbeiten. Aus diesen beiden Tests (WLTC 5.3 und Autobahntest) werden dann die Verbrauchs- und Emissionswerte ermittelt und mit einem Punkte- und Sternsystem bewertet, um Verbrauchern einen besseren, da genaueren Überblick zu verschaffen.

Um den realen Verbräuchen von Autos nahe zu kommen, bedienen sich Wissenschaftler auch Onlineforen und -plattformen, auf denen Verbrauchsdaten von Privatpersonen und Herstellern gelistet werden. Diese Daten werden teilweise miteinander kombiniert, um einen möglichst realistischen Verbrauch zu erhalten.³⁴

6.2.3. Nutzerbasierte Verbrauchsbestimmung speziell bei PHEV (Utility Factor)

Komplexer ist die Verbrauchsbestimmung bei PHEV, da diese sowohl einen elektrischen als auch einen konventionellen Antrieb zur Fortbewegung nutzen. Innerhalb des elektrischen Fahrens muss hier zusätzlich zwischen zwei Modi unterschieden werden: Der normale Modus ist der **Charge-Depleting Mode (CD)**. Hierbei handelt es sich um den „klassischen“ Elektromodus, bei dem das Fahrzeug nur über den Elektromotor angetrieben wird, wodurch die Batterie dementsprechend entladen wird. Ist die Batterie bis zu einem bestimmten Punkt entladen, wechselt das Fahrzeug in den **Charge-Sustaining Mode (CS)**. Hierbei kann das Fahrzeug zwar noch einige Hybrid-Funktionen ausführen (beispielsweise Bremskraftrückgewinnung für die Batterie), jedoch wird dadurch lediglich der geringe Ladestand der Batterie erhalten und das Fahrzeug fährt ansonsten im normalen Verbrennermodus. Da das Verhältnis von CD zu CS vom jeweiligen Fahr-

32 <https://www.adac.de/verkehr/abgas-diesel-fahrverbote/abgasnorm/wltp-messverfahren/>; <https://www.sueddeutsche.de/wirtschaft/verkehr-verbrauch-was-unterscheidet-messverfahren-nefz-und-wltp-dpa.urn-newsml-dpa-com-20090101-200608-99-348277>.

33 <https://www.adac.de/rund-ums-fahrzeug/tests/ecotest/>.

34 Jöhrens, et al. (2020), Plug-in hybrid electric cars: Market development, technical analysis and CO₂ emission scenarios for Germany, ifeu – Institute for Energy and Environmental Research Heidelberg, Transport & Environment, Öko-Institut e.V., <https://www.oeko.de/uploads/oeko/oekodoc/PHEV-Report-Market-Technology-CO2.pdf>, S. 42.

zeug abhängt (Kapazität der Batterie, Motorleistung, Energieverbrauch etc.), kann keine allgemeingültige Aussage darüber getroffen werden, welche Anteile im CS-Modus oder im CD-Modus gefahren werden. Daher wurde für das WLTP-Testverfahren ein sogenannter Utility Factor (UF) eingeführt, um die Variable zwischen CD und CS im Prüfverfahren vergleichbarer mit konventionellen Antrieben zu machen.³⁵

6.3. Berechnung der CO₂-Vermeidungskosten

Die Vermeidungskostenberechnung zählt zu den Investitionskostenberechnungen und führt zu einer ökonomischen Vergleichsgröße, die eine Kostenparität zwischen einer Alternative und einer Referenz herstellt. CO₂-Vermeidungskosten geben die Kosteneffizienz einer CO₂-Minderungsmaßnahme an.³⁶ Damit gehen die CO₂-Vermeidungskosten ein Stück weiter als die reine Bestimmung der CO₂-Emissionen. Zwei vergleichende CO₂-einsparende Maßnahmen werden anhand ihrer CO₂-Emissionen und ihrer jeweiligen Kosten ins Verhältnis gesetzt, so dass daraus ein Effizienzwert pro eingesparter CO₂-Tonne gebildet wird. Dieser wird in €/t CO₂ angegeben.

Zu Details und Berechnungsformeln der CO₂-Vermeidungskosten siehe:

- Fahl, U. (2007), CO₂-Vermeidungskosten von Maßnahmen im Vergleich. Abgas- und Verbrauchsverringerung: Auswirkungen auf Luftqualität und Treibhauseffekt; mit 19 Tabellen, 2007, 72. Jg., S. 73 f.
- Zapf, M. et al. (2021), Kosteneffiziente und nachhaltige Automobile, Bewertung der realen Klimabelastung und der Gesamtkosten – Heute und in Zukunft, Aufl. 2. Springer Vieweg, <https://doi.org/10.1007/978-3-658-33251>.

Nur einige Studien gehen auf die CO₂-Vermeidungskosten von elektrifizierten Autos ein. Die Vermeidungskostenberechnung wird mit zwei Zielsetzungen verwendet. Die CO₂-Vermeidungskostenberechnungen werden einerseits genutzt, um abzuschätzen, in welchem Maße sich für die KFZ-Halter Verbrenner gegenüber elektrischen Antrieben rentiert (**betriebswirtschaftliche Betrachtung**). Hier steht vor allem das möglichst realistische Abbild des CO₂-Ausstoßes im Mittelpunkt. Andererseits wird die Kostenberechnung für den Vergleich von politischen Maßnahmen genutzt (**volkswirtschaftliche Betrachtung**). Hier steht vor allem die umfassende Berücksichtigung aller relevanten systemischen Kosten (für Förderungen, Ausbau von Ladeinfrastruktur, aber

35 ICCT Riemersma, Mock (2017), Too low to be true? How to measure fuel consumption and CO₂ emissions of plug-in hybrid vehicles, today and in the future, https://theicct.org/sites/default/files/publications/EU-PHEV_ICCT-Briefing-Paper_280717_vF.pdf, Jöhrens, et al. (2020), Plug-in hybrid electric cars: Market development, technical analysis and CO₂ emission scenarios for Germany, ifeu – Institute for Energy and Environmental Research Heidelberg, Transport & Environment, Öko-Institut e.V., <https://www.oeko.de/uploads/oeko/oekodoc/PHEV-Report-Market-Technology-CO2.pdf>, S. 47.

36 Zapf et al. (2021), Kosteneffiziente und nachhaltige Automobile, Bewertung der realen Klimabelastung und der Gesamtkosten – Heute und in Zukunft, Aufl. 2. Springer Vieweg, <https://doi.org/10.1007/978-3-658-33251>, S. 311.

auch Steuermindereinnahmen) im Mittelpunkt, die mit der Maßnahme und der Vergleichsmaßnahme in Verbindung stehen.

7. Stand der Wissenschaft

Die bereits erwähnte Unterscheidung zwischen der Berechnungen der CO₂-Emissionen der verschiedenen Antriebsarten sowie die Kostenbetrachtung der CO₂-Vermeidung werden in der Literatur unterschiedlich abgebildet. Ein Großteil der Untersuchung befasst sich mit dem Erfassen der CO₂-Emissionen. Nur wenige Studien versuchen, die CO₂-Vermeidungskosten von Verbrennermotoren mit elektrifizierten Fahrzeugen zu vergleichen, da sich zusätzlich zur Berechnungskomplexität der CO₂-Emissionen weitere Unschärfen bei den erforderlichen Annahmen (Höhe und Umfang der Gesamtkosten, Nutzungsdauer, Auslastung, kalkulatorischer Zinssatz) jeder Alternative bilden.³⁷

Im Folgenden wird ein Überblick zum aktuellen Stand der CO₂-Emissionen und der Vermeidungskosten gegeben.³⁸

7.1. CO₂-Emissionen: Fraunhofer ISI und ICCT (2022)

- Plötz P. et al. (2022), Real-world usage of Plug-in Hybrid vehicles in Europe – a 2022 update in fuel consumption, electric driving, and CO₂ emissions, Fraunhofer ISI und ICCT, <https://theicct.org/wp-content/uploads/2022/06/real-world-phev-use-jun22.pdf>.

Das Fraunhofer Institut ISI und der ICCT und haben jüngst eine Studie von 2020 bezüglich der Emissionen speziell von PHEV aktualisiert. Durch eine Analyse von Daten basierend auf ca. 8.800 Hybrid-Fahrzeugen aus 27 Ländern (80 % der Fahrzeuge aus Deutschland) kommen die Autoren zu dem Ergebnis, dass die Realverbräuche und -emissionen der PHEV von den Werten der WLTP-Typgenehmigung teilweise um das Fünffache abweichen (siehe Abbildung 10).

37 Fahl, U. (2007), CO₂-Vermeidungskosten von Maßnahmen im Vergleich. Abgas- und Verbrauchsverringerung: Auswirkungen auf Luftqualität und Treibhauseffekt, 72. Jg., S. 73 f.

38 Die Auswahl erhebt keinen Anspruch an Vollständigkeit.

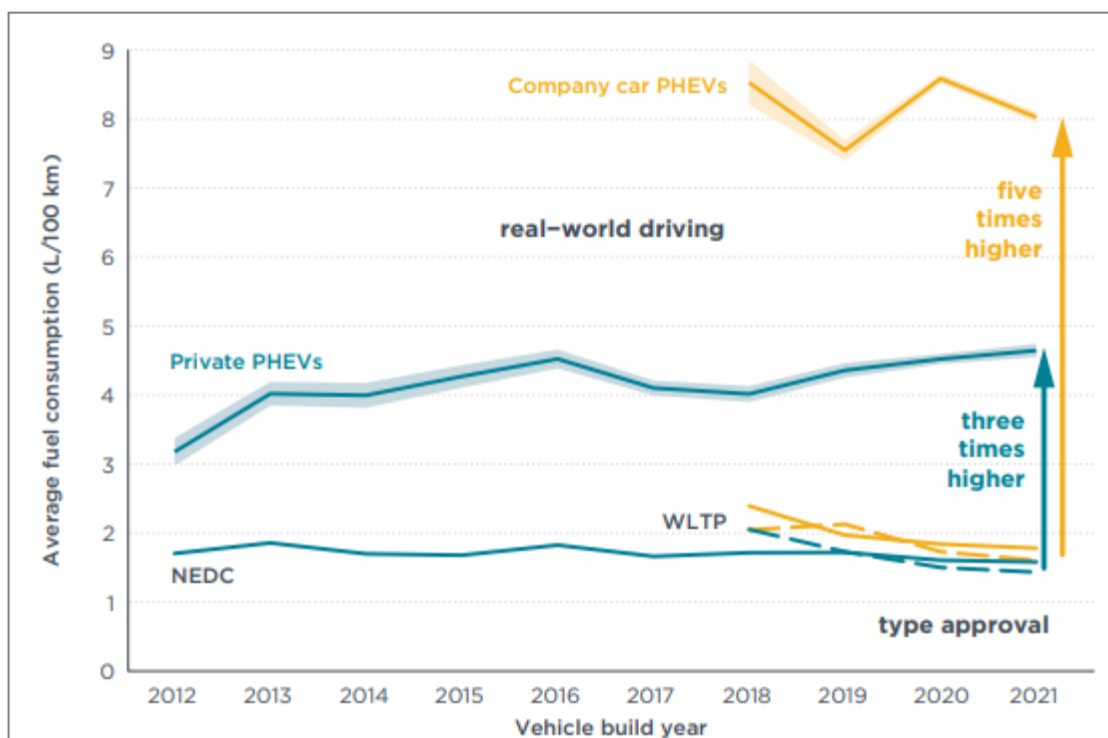


Abbildung 10: Development of the average real-world and type-approval fuel consumption of private and company car PHEVs in Europe over build year³⁹

Die Forscher stellen fest, dass die getesteten PHEV anstatt der typengenehmigten 1,6-1,7 l/100 km 4,0-4,4 l/100 km (Privatfahrzeuge) bzw. 7,6-8,4 l/100 km (Geschäftswagen) im Realbetrieb verbrauchen. Dies führe zu CO₂-Emissionen von 90-105 g CO₂/km für Privatfahrzeuge und 175-195 g CO₂/km für Geschäftswagen. Im WLTP-Verfahren waren nur 37-39 g CO₂/km genehmigt worden.⁴⁰

Diese Abweichungen der realen Verbräuche und Emissionen – welche seit 2012 jährlich angestiegen seien – beruhten vor allem auf vier Faktoren:⁴¹

- Die reale Reichweite des Elektroantriebs sei deutlich kürzer als unter Testbedingungen.
- Langstreckenfahrten seien allein durch den Elektromotor nicht tragbar, sodass ein Großteil der Strecke dann mit dem normalen Verbrenner gefahren werde.
- Viele Fahrzeuge würden nicht ausreichend geladen werden, um Alltagsfahrten auch im reinen Elektromodus zu bewältigen.

39 Plötz et al. (2022), Real-world usage of Plug-In-Hybrid Vehicles in Europe – A 2022 update on fuel consumption, electric driving, and CO₂ emissions, <https://theicct.org/wp-content/uploads/2022/06/real-world-phev-use-jun22.pdf>, S. 2.

40 Ebd., S. 10 ff.

41 Ebd., S. 19 ff.

- Sofern der normale Verbrennungsmotor genutzt wird, verbrauche und emittiere dieser deutlich mehr als nach dem WLTP-Verfahren angegeben wurde.

Die ersten drei Faktoren, so die Forscher, könnten durch eine Anpassung des WLTP aufgrund des (im Realbetrieb deutlich geringeren) Anteils an rein elektrischen Fahrten korrigiert werden.

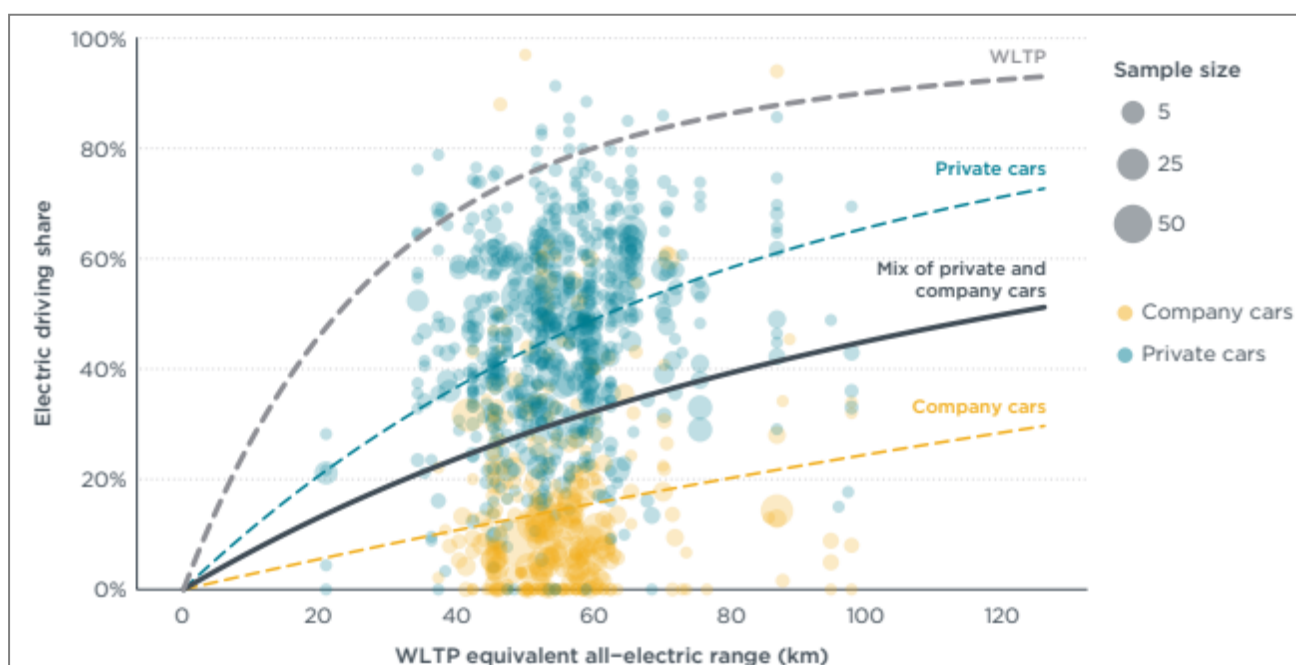


Abbildung 11: Real-world electric driving share of WLTP type-approved PHEVs compared to WLTP assumption on charge-depleting mode driving share and real-world adjusted UF curves⁴²

Somit kritisieren Plötz et al. die Eingruppierung von PHEV als ähnlich emissionsarm oder sogar emissionsfrei wie reine BEV. Darüber hinaus sollten Förderung und Kaufanreize lediglich auf solche PHEV begrenzt werden, die tatsächlich einen hohen Anteil an rein elektrischen Fahrten und einen geringen Gesamtverbrauch aufweisen.⁴³

7.2. CO₂-Emissionen: Buberger et al. (2022)

- Buberger et al. (2022), Total CO₂-equivalent life-cycle emissions from commercially available passenger cars, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 159, (2022), 112-158.

In der Studie mit 790 verschiedenen Fahrzeugen über eine Betrachtung des gesamten Lebenszyklus kommen die Autoren zum Ergebnis, dass sowohl BEV als auch moderne PHEV insgesamt eine

42 Ebd., S. 15.

43 Ebd., S. 5.

bessere CO₂-Bilanz aufweisen als ein moderner Verbrennungsmotor (ICEV) und zwar insbesondere durch den Einsatz von Strom aus erneuerbaren Energien.

„Nonetheless, it is shown that conventional gasoline and diesel vehicles emit the highest amount of total life-cycle GHGs in comparison to vehicles powered by other available energy resources. When using green electricity, plug-in hybrid electric and fully electric vehicles can reduce the total life-cycle emission in comparison to combustion engine vehicles by 73% and 89%, respectively.“⁴⁴

Es sei nicht ausreichend, sich bei den Emissionsberechnungen lediglich auf die lokalen Emissionen durch die Nutzung der Fahrzeuge zu beschränken. Denn diese würden nach wie vor häufig mit null angegeben, da elektrisierte Antriebe keine CO₂-Emissionen beim Betrieb ausschieden. Für eine bessere Vergleichbarkeit der Antriebsarten wurden daher sämtliche Emissionen von der Bereitstellung der Energie während der Produktion, über die Nutzung (*Well-to-Tank emissions*, *WtT*) bis hin zum Recycling in die Untersuchung einbezogen (siehe Abbildung 12).

„Therefore, to fully assess the utilization emissions, the WtT emissions must be considered as well. These should include all emissions from the production, the storage and, further, the shipping/transportation of the used fuel or transmission of the electric energy.“⁴⁵

44 Buberger et al. (2022), Total CO₂-equivalent life-cycle emissions from commercially available passenger cars, https://www.researchgate.net/publication/358276768_Total_CO_2_-Equivalent_Life-Cycle_Emissions_from_Commercially_Available_Passenger_Cars, S. 6.

45 Ebd., S. 4.

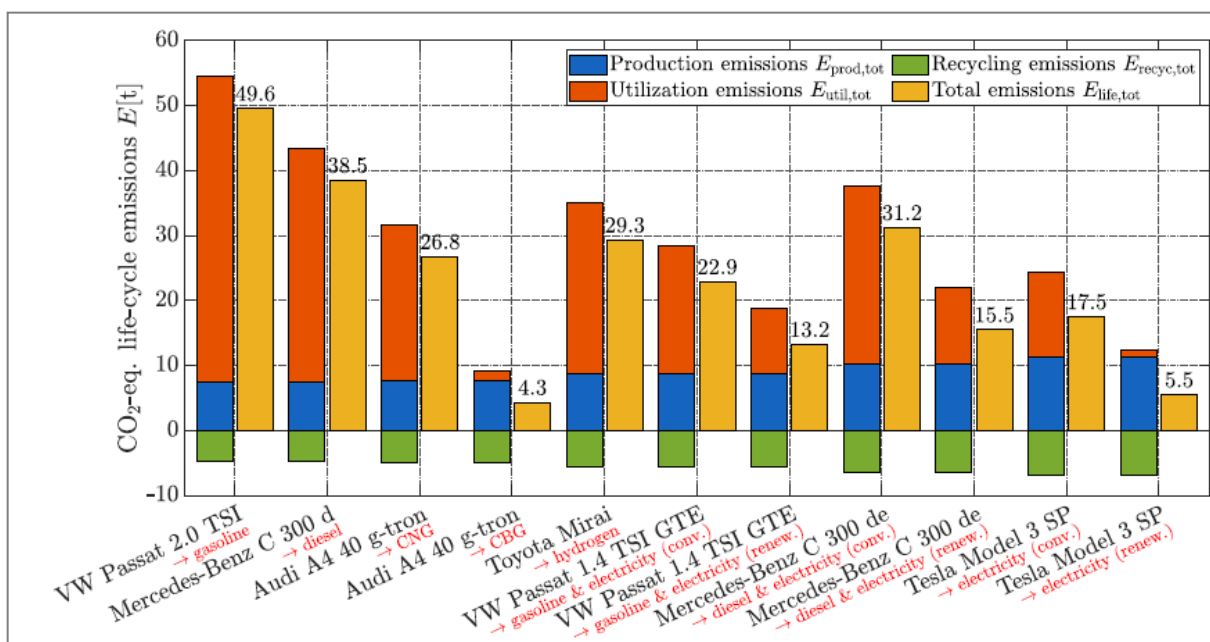


Abbildung 12: Total life-cycle emissions of mid-size car selection, including production, utilization and recycling emissions⁴⁶

Dies führt jedoch dazu, dass Angaben zu Emissionsdaten nur schwer vergleichbar sind, da die Emissionen bei der Erzeugung und Bereitstellung der Energie (unabhängig ob Kraftstoffe oder Strom) stark von der jeweiligen Region abhängen.

7.3. CO₂-Emissionen: Zapf et al. (2021)

- Zapf, M. et. al (2021), Kosteneffiziente und nachhaltige Automobile, Bewertung der realen Klimabelastung und der Gesamtkosten – Heute und in Zukunft, Aufl. 2. Springer Vieweg. <https://doi.org/10.1007/978-3-658-33251>.

Zapf et al. gehören zu den wenigen Autoren, die in ihrer Studie nicht nur auf die Verbräuche und Emissionen, sondern konkret auch auf CO₂-Vermeidungskosten eingehen (auf die Höhe der CO₂-Vermeidungskosten wird im späteren Kapitel 7.10 eingegangen). Die Autoren stellen wie die vorherigen Studien zunächst fest, dass bei den Berechnungen zu Verbräuchen der unterschiedlichen Antriebstechnologien die Herstellerangaben teils deutlich von den Realverbräuchen abweichen (siehe Abbildung 13) und somit nicht als alleinige Referenz dienen sollten.

„[Es] wird ersichtlich, dass die Herstellerangaben bezüglich CO₂-Emissionen nach dem NEFZ-Verfahren die tatsächlichen THG-Emissionen gemäß einer Lebenszyklusanalyse nicht hinreichend abbilden. Entsprechend ist eine ausschließliche Betrachtung der direkten

Emissionen am Auspuff (TTW) wie auch des Normverbrauchs für die Bewertung der Gesamtemissionen von Fahrzeugen nicht ausreichend.“⁴⁷

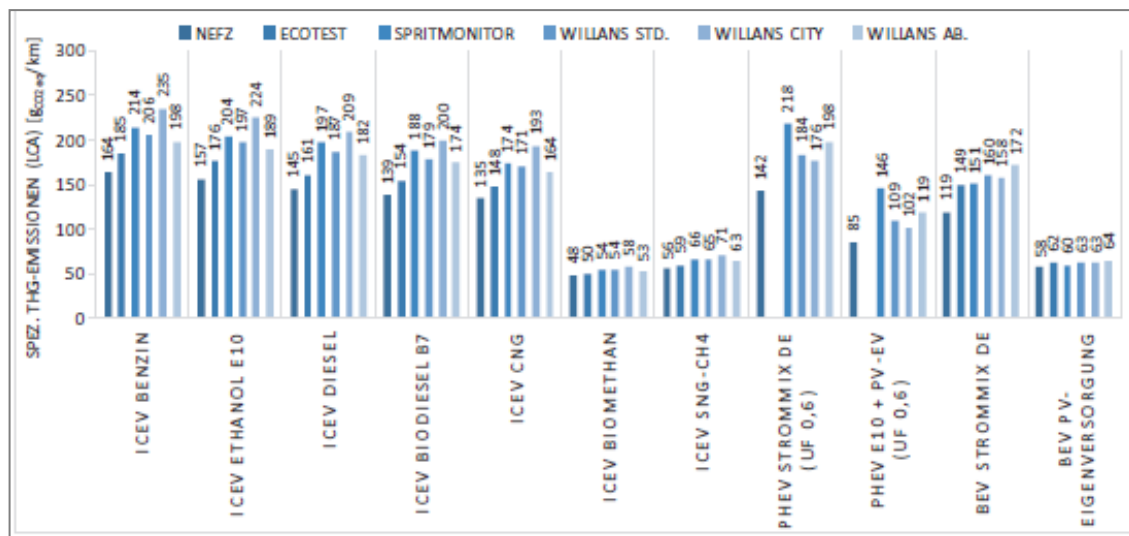


Abbildung 13: Spez. THG-Emissionen (LCA) für unterschiedliche Referenzfahrzeuge nach Energieträgern und Verbrauchsdaten⁴⁸

„Die Abbildungen verdeutlichen die Relevanz einer Bewertung von Antriebstechnologien gemäß dem Kunden- bzw. Realverbrauch anstatt dem Normverbrauch nach dem NEFZ-Verfahren.“⁴⁹

Wie auch in anderen Studien zeigt sich, dass wenn insbesondere PHEV nicht mit Ökostrom, sondern mit dem deutschen Strommix (von 2016) geladen werden, diese teilweise eine schlechtere CO₂-Bilanz als Benziner aufweisen. Sowohl bei den BEV als auch bei den PHEV konnte eine signifikante Reduktion der THG-Emissionen festgestellt werden, sofern das Fahrzeug mit Strom aus einer Eigenversorgung mittels Photovoltaik-Anlage geladen werden konnte.

7.4. CO₂-Emissionen: Hirz, Nguyen (2022)

- Hirz, M.; Nguyen, T.T. Life-Cycle CO₂-Equivalent Emissions of Cars Driven by Conventional and Electric Propulsion Systems. *World Electr. Veh. J.* 2022, 13, 61. <https://doi.org/10.3390/wevj13040061>.

Hirz und Nguyen arbeiten in ihrer Analyse detailliert die einzelnen Variablen der Lebenszyklusanalyse heraus und fokussieren sich auf den sogenannten „CO₂-Rucksack“ batteriegetriebener Fahrzeuge. Demnach sind Elektro- und Hybridfahrzeuge in der Produktion aufgrund der verbau-

47 Ebd., S. 315.

48 Ebd., S. 318.

49 Ebd., S. 317.

ten Batterie CO₂-intensiver als Verbrenner. Vergleicht man nun die Produktion von vergleichbaren Fahrzeugen aus der Kompaktklasse, zeigt sich, dass die BEV-Produktion mit ca. 14 t CO₂-Äquivalenten nahezu doppelt so viel CO₂ emittiert wie ein moderner Verbrenner (7,5 t CO₂-Äquivalente) (siehe Abbildung 14).

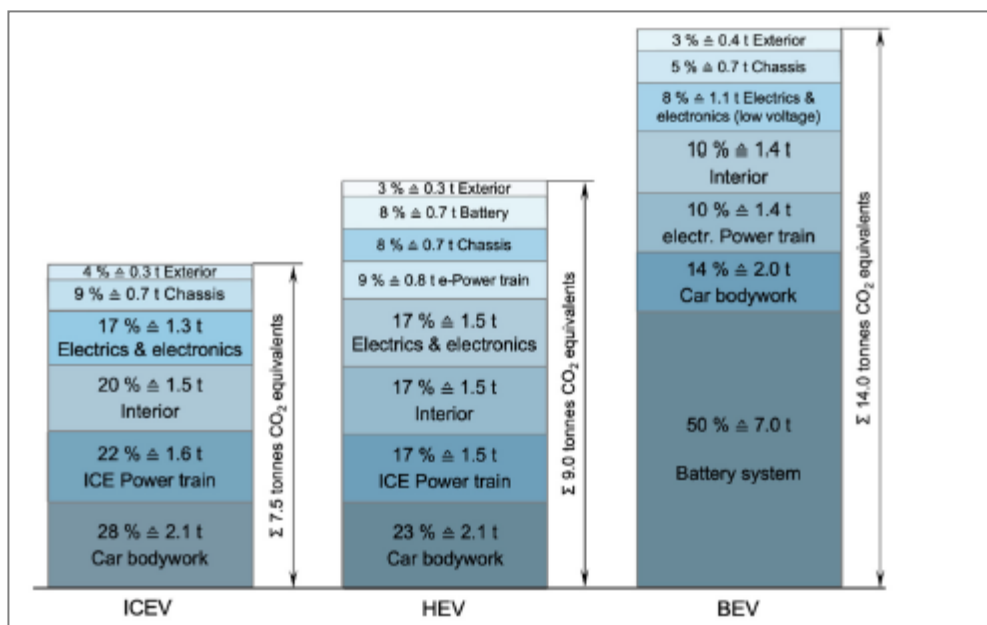


Abbildung 14: LCA-based production-related CO₂-equivalent-emission impacts of selected compact cars, equipped with different propulsion technologies⁵⁰

Im Rahmen der Produktion emittiert ein BEV, hauptsächlich aufgrund der Batterie, einen um 50-100 % höheren CO₂-Anteil im Vergleich zu einem modernen Verbrennungsmotor. Hybridfahrzeuge befinden sich diesbezüglich – je nach Grad der Elektrifizierung – zwischen Verbrennern und reinen Elektrofahrzeugen. Die Schwankungen bei den CO₂-Emissionen bei BEV und PHEV hängen maßgeblich von der Größe und Kapazität der Batterie ab (siehe Abbildung 15).

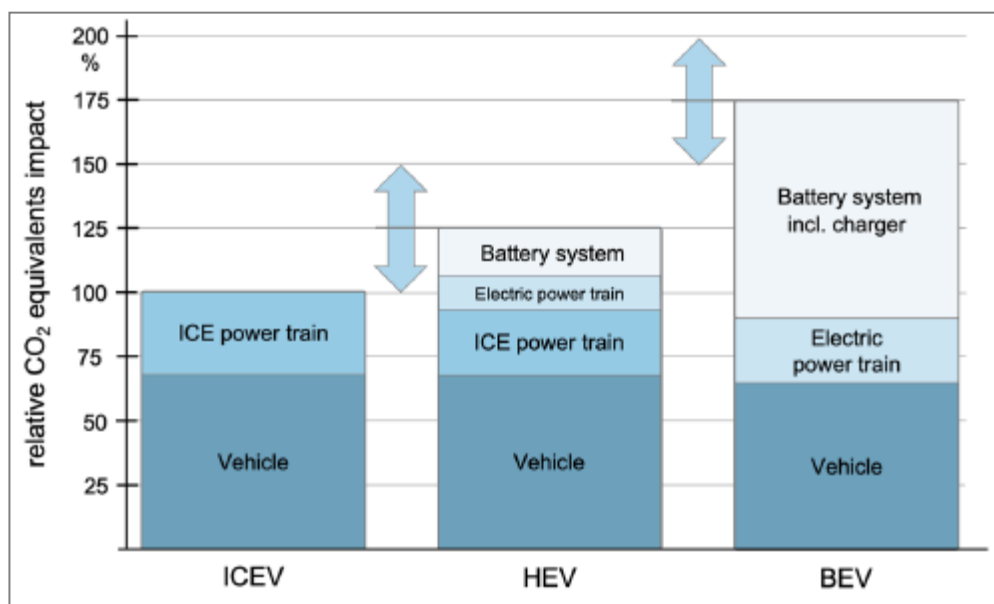


Abbildung 15: CO₂-equivalent-emission impacts of vehicle production in comparison⁵¹

Es kommen jedoch in der Nutzungsphase aufgrund des Elektroantriebs zum CO₂-Rucksack weniger Emissionen hinzu. Je nach spezifischem Anteil erneuerbarer Energien am Strommix eines jeweiligen Landes „überholen“ CO₂-emittierende Verbrenner ab einer bestimmten Fahrdistanz den vormals höheren CO₂-Ausstoß der Elektrofahrzeuge. In dem Zusammenhang kommen jedoch im Einzelfall höchst individuelle Einflussfaktoren zum Tragen, wie die Größe des CO₂-Rucksacks, der maßgeblich von der Kapazität und den Produktionsbedingungen der Batterie bestimmt werde, sowie das individuelle Fahr- und Ladeverhalten und der erwähnte nationale Strommix. Aufgrund dessen ergibt sich keine einheitlich voraussehbare Laufleistung, ab der ein BEV bzw. PHEV klimagünstiger ist als ein Verbrenner. Im Modell der Wissenschaftler zeigt sich eine Laufleistungsspannweite von etwa 45.000 km bis zu fast 200.000 km (siehe Abbildung 16).

51 Hirz, Nguyen (2022), Life-Cycle CO₂-Equivalent Emissions of Cars Driven by Conventional and Electric Propulsion Systems, https://www.researchgate.net/publication/359618965_Life-Cycle_CO2-Equivalent_Emissions_of_Cars_Driven_by_Conventional_and_Electric_Propulsion_Systems, S. 6.

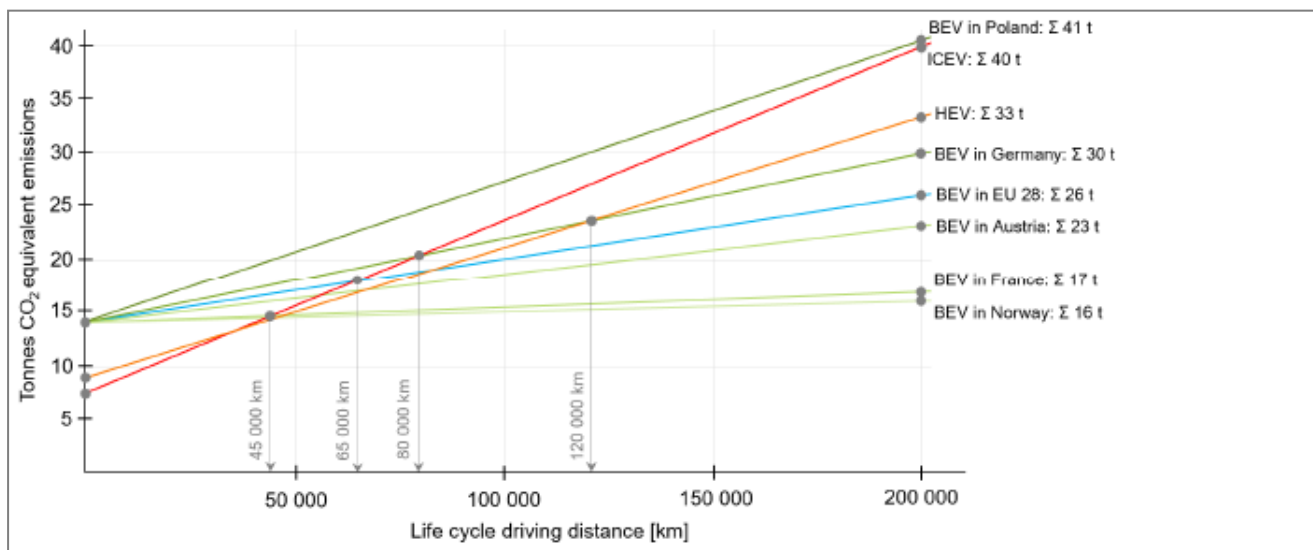


Abbildung 16: Life-cycle CO₂-equivalent emissions of compact cars with different propulsion systems and exemplarily varied carbon footprints of electric-power generation⁵²

7.5. CO₂-Emissionen: Jöhrens, et al. (2020)

- Jöhrens, et al. (2020), Plug-in hybrid electric cars: Market development, technical analysis and CO₂ emission scenarios for Germany, ifeu – Institute for Energy and Environmental Research Heidelberg, Transport & Environment, Öko-Institut e.V., <https://www.oeko.de/uploads/oeko/oekodoc/PHEV-Report-Market-Technology-CO2.pdf>.

Die Autoren stellen ebenfalls eine hohe Abweichung der Realverbräuche bei PHEV fest. Dies ist vor allem vor dem Hintergrund des stärkeren Anstiegs der Anzahl verkaufter PHEV im Jahr 2020 (hier vor allem als Dienstwagen) problematisch. Die Motorleistung der PHEV sei im Vergleich überdurchschnittlich und PHEV seien überdurchschnittlich schwer (Abbildung 17), was zu höheren Verbräuchen führt.

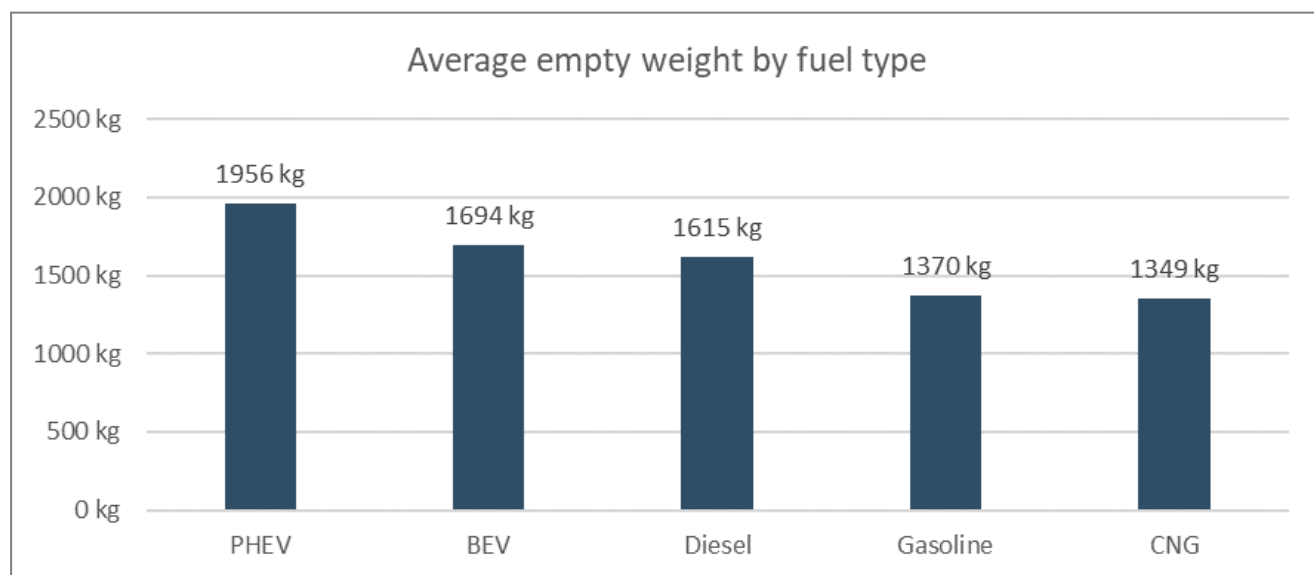


Abbildung 17: Durchschnittliches Leergewicht je Antriebstechnologie⁵³

Allerdings seien Elektromotoren im Vergleich zur Systemleistung relativ klein. Daher werde der Elektromotor in PHEV im Wesentlichen wie bei einem Hybrid ohne externe Lademöglichkeit genutzt (Elektromotor zur Unterstützung), was den Sinn einer externen Aufladung untergrabe. Hinzu komme, dass bisherige Testverfahren, wie das NEFZ aber auch das weiterentwickelte WLPT-Verfahren, einen im Vergleich zur Realität zu großen rein elektrischen Fahranteil zugrunde legen.

„Insbesondere bei Dienstwagen wurden beispielsweise für PHEV mit einer elektrischen Reichweite von 50 km nach WLTP im Mittel nur ein elektrischer Fahranteil von etwa 15 % beobachtet. Bei Privatfahrzeugen sind die elektrischen Fahranteile zwar höher (im Beispiel etwa 50 %), aber immer noch deutlich unterhalb des im WLTP angenommenen Werts von etwa 75 %.”⁵⁴

Die Autoren argumentieren, dass sich der Utility Factor der PHEV (siehe Kapitel 6.2.3) ändern müsse, ansonsten trügen bis 2030 PHEV zu jährlichen Mehremissionen von bis zu 4,3 Mio. Tonnen CO₂ bei. Um gegenzusteuern, empfehlen die Autoren weitreichende politische Maßnahmen, die auf das Fahrverhalten, technische Einstellmöglichkeiten und das Monitoring abzielen.⁵⁵

53 Jöhrens, et al. (2020), Plug-in hybrid electric cars: Market development, technical analysis and CO₂ emission scenarios for Germany, ifeu – Institute for Energy and Environmental Research Heidelberg, Transport & Environment, Öko-Institut e.V., <https://www.oeko.de/uploads/oeko/oekodoc/PHEV-Report-Market-Technology-CO2.pdf>, S. 33.

54 Ebd., S. 8.

55 Ebd., S. 83.

7.6. CO₂-Emissionen: Agora Verkehrswende (2019)

- Agora Verkehrswende (2019), Klimabilanz von Elektroautos. Einflussfaktoren und Verbesserungspotenzial., https://www.agora-verkehrswende.de/fileadmin/Projekte/2018/Klimabilanz_von_Elektroautos/Agora-Verkehrswende_22_Klimabilanz-von-Elektroautos_WEB.pdf

Das ifeu Institut führte im Auftrag der Agora Verkehrswende neben einer eigenen Lebenszyklusanalyse eine Metastudie mit 23 Studien durch. Dabei wurden die Ökobilanzen aus den Lebenszyklen betrachtet. Eine Erkenntnis ist, dass es wenige Primärdaten zur industriellen Batterieherstellung gibt – dem Prozessschritt, bei dem die meisten CO₂-Emissionen anfallen. Die meisten Arbeiten greifen auf wenige zentrale Datenbanken zur Batterieherstellung zurück, die sich oft aufgrund verschiedener Annahmen unterscheiden (Größe der betrachteten Fahrzeugklassen, technische Unterschiede, Nutzungsverhalten, unterschiedliche Systemgrenzen (siehe Kapitel 6.2.1). Abbildung 18 gibt einen Überblick über die unterschiedlichen Annahmen und Ergebnisse ausgewählter Studien der Metaanalyse:

	[Notter et al. 2010]	[Hawkins et al. 2010]	[Daimler 2014]	[Bauer et al. 2015]	[Helms et al. 2016]	[Ellingsen et al. 2016]	[Mierlo et al. 2017]	[Cheron et al. 2017]	[Messaggio 2017]	[ICCT 2018]	[ADAC 2018]
Treibhausgasemissionen (g CO ₂ e/km)	162	197	150	210	199	146	51	105	90	130	150
Fahrzeugklasse	Kompaktkl.	-	Kompaktkl.	Ob. Mittelkl.	Kompaktkl.	Kleinwagen	-	Ob. Mittelkl.	-	Kompaktkl.	Kompaktkl.
Nutzungsphase											
Lebensfahrl. (km)	150.000	150.000	160.000	240.000	168.000	180.000	209.596	250.000	-	150.000	150.000
Verbrauch (kWh/100 km)	17	17,3	16,6–17,9	21,4	21,9	17	-	21,1	20	20,5	14,7
Fahrzyklus	NEFZ	NEFZ	NEFZ	Real*	Real*	NEFZ	-	Real*	Real*	Real*	EcoTest
Strommix	CH	EU	EU	CH/EU	DE-2013	EU	BE	FR-2015	EU-2015	EU	DE-2013
Herstellung (Batterie)											
Zellchemie	LMO	NMC	NCA	LMO	Mix: LFP, NCA, NMC	NMC	LMO, LFP	NMC	LMO	Li-Ion	Mix: LFP, NCA, NMC
Kapazität (kWh)	34	24	-	25	27,3	26,6	-	-	45	30	28
Energiedichte (Wh/kg)	113	112	115	105	81,6	105	-	-	118	100	-
Treibhausgasemissionen Batterie (kg CO ₂ e/kWh)	52,6	187,5	-	84 (2mal)	124	120	-	-	55	175	129
Anmerkung: Türkis markiert sind besondere Treiber für die gesamte Bilanz. * Es werden Fahrzyklen angesetzt, die weitgehend realistisches Fahrverhalten abbilden.											

Abbildung 18: Auswahl einflussnehmender Rahmenbedingungen in der Klimabilanz

Ein ebenfalls heterogenes Bild zeigt sich bei dem jeweiligen Anteil der anfallenden CO₂-Emissionen in den Lebenszyklen elektrischer Fahrzeuge. Der Anteil der Fahrzeugherstellung variiert zwischen 18 und 52 Prozent, der Anteil der Batterieproduktion zwischen 7 und 27 Prozent und der Anteil der Nutzungsphase zwischen 23 und 70 Prozent.⁵⁶

Besonders in den Fokus nehmen die Autoren die Batterieproduktion, da hier eine einzelne Komponente einen hohen Energieverbrauch in der Produktion erzeugt, unterschiedlichen Technologien (Zellchemie) zum Einsatz kommen und die Batteriegröße und –dichte maßgeblichen Einfluss auf die Eigenschaften des Fahrzeugs haben (Reichweite aufgrund der Kapazität und des Gewichts). In den kommenden Jahren erwarten die Experten, dass sich die Treibhausgasemissionen der Batterieherstellung bis 2030 halbieren.⁵⁷

Legt man diese Annahme zugrunde, so ergibt sich ab einem bestimmten Zeitpunkt ein Fokuswechsel von den Produktionsemissionen weg und hin zu den Emissionen durch die Herstellung und Verteilung des Bewegungsstroms der BEV und PHEV. Dieser Fahrstrom wäre dann die entscheidende Einflussgröße für die Klimabilanz elektrisierter Fahrzeuge.⁵⁸

In der nachfolgenden vom ifeu Institut durchgeführten Lebenszyklus-Analyse wurden Emissionen von Benzin- und Diesel-Fahrzeugen mit drei Varianten der Elektroauto-Nutzung verglichen und die Wendepunkte (Break Even Points), an denen ein BEV weniger CO₂ emittiert als ein Verbrenner, anhand der Lebensfahrleistung dargestellt (siehe Abbildung 19).

56 Agora Verkehrswende (2019), Klimabilanz von Elektroautos. Einflussfaktoren und Verbesserungspotenzial., https://www.agora-verkehrswende.de/fileadmin/Projekte/2018/Klimabilanz_von_Elektroautos/Agora-Verkehrswende_22_Klimabilanz-von-Elektroautos_WEB.pdf, S. 23.

57 Ebd., S. 10.

58 Ebd., S. 11.

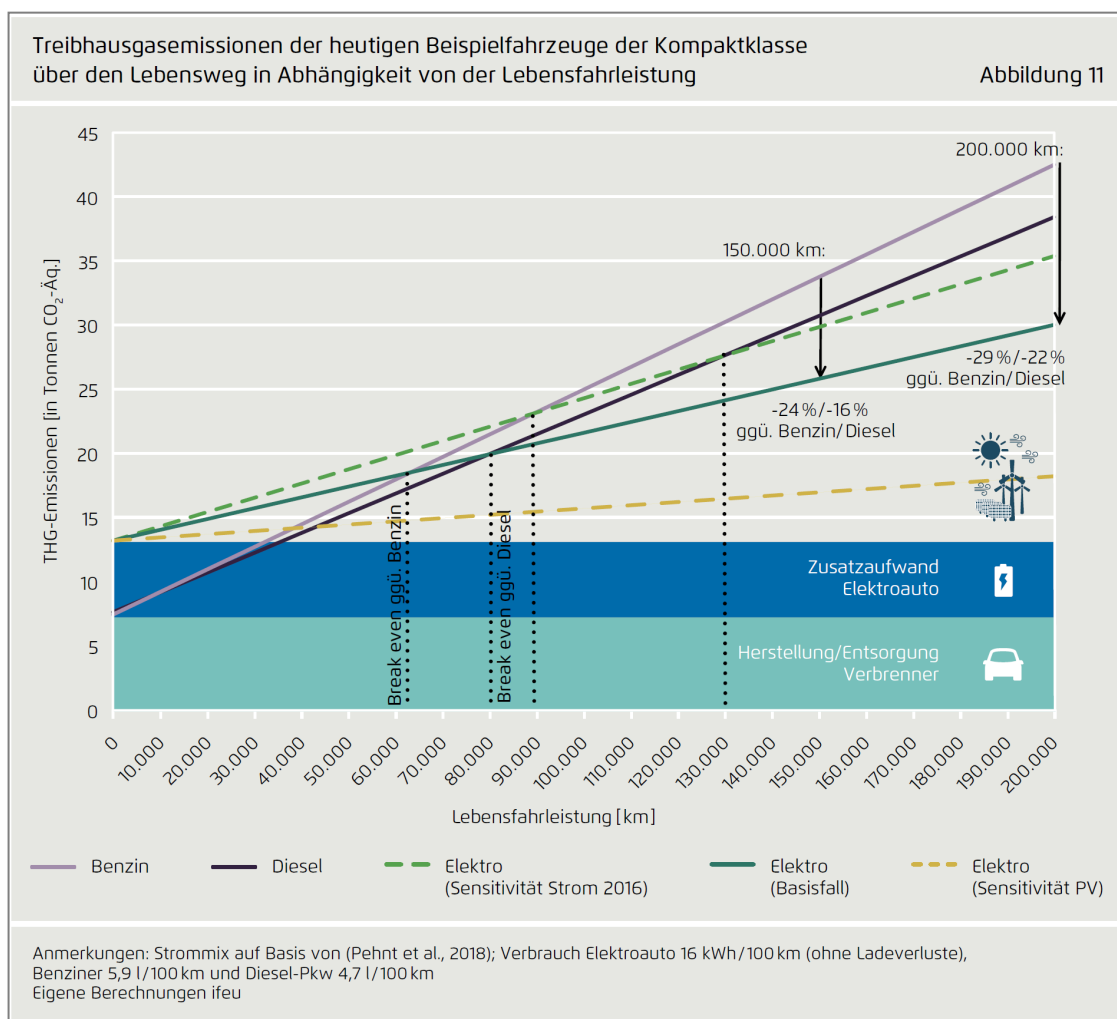


Abbildung 19: Treibhausgasemissionen der heutigen Beispielfahrzeuge der Kompaktklasse über den Lebensweg in Abhängigkeit von der Lebensfahrleistung

7.7. CO2-Emissionen: Volvo – Carbon footprint report C40

- Volvo C40 Recharge – Carbon footprint report: <https://www.volvocars.com/images/v/-/media/Market-Assets/INTL/Applications/DotCom/PDF/C40/Volvo-C40-Recharge-LCA-report.pdf>

Bei der Emissionsberechnung von elektrisierten Fahrzeugen wird immer wieder der Mangel an Primärdaten der Fahrzeug- und Batterieproduktion hervorgehoben. Als einer der wenigen Hersteller hat Volvo einen Bericht zur CO₂-Bilanz seiner elektrischen Fahrzeugmodelle C40 Recharge und XC40 Recharge im Vergleich zu der konventionellen Verbrennervariante XC40 veröffentlicht. Wie auch bei den Studien zuvor, werden die ähnliche Rahmenbedingungen und Methoden zugrunde gelegt.

Schweden übernimmt – wie ganz Skandinavien – eine Sonderrolle in Europa ein, da bereits ein überwiegender Teil des Stroms aus CO₂-armen Quellen bzw. erneuerbaren Energien gewonnen

wird.⁵⁹ Daher wird in dem Bericht von Volvo vor allem auf die Produktionsemissionen eingegangen, da der Bewegungsstrom in Skandinavien emissionsärmer produziert wird als im Rest Europas und der Welt. Hierdurch ergeben sich auch deutliche Unterschiede bei den Wendepunkten der Ökobilanz:

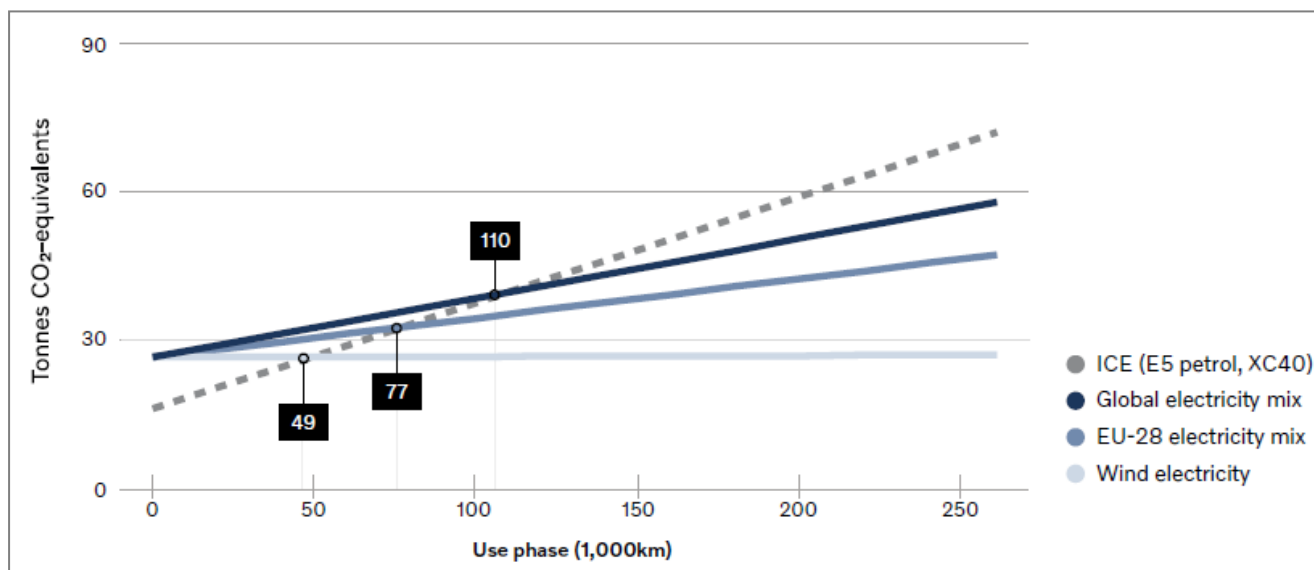


Abbildung 20: Total amount of GHG emissions, depending on total km driven, from ICEV (dashed line) to BEV with different electricity mixes in the use phase⁶⁰

Danach ergibt sich bei ausschließlicher Nutzung von Bewegungsstrom aus Windenergie bereits nach 49.000 km eine bessere CO₂-Bilanz des BEV gegenüber dem Verbrenner. Bei Verwendung des derzeitigen EU-Strommixes ist das BEV ab etwa 77.000 km klimafreundlicher; bei globalem Strommix ab etwa 110.000 km.

Vehicle type	Break-even (km)
C40 Recharge, Global electricity mix/XC40 ICE	110,000
C40 Recharge, EU-28 electricity mix/XC40 ICE	77,000
C40 Recharge, wind electricity mix/XC40 ICE	49,000

Abbildung 21: Number of km driven at break-even between C40 Recharge and XC40 ICE (E5 petrol) with different electricity mixes⁶¹

59 <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/182181/umfrage/struktur-der-bruttostromerzeugung-in-schweden/>.

60 Volvo C40 Recharge – Carbon footprint report, <https://www.volvocars.com/images/v/-/media/Market-Assets/INTL/Applications/DotCom/PDF/C40/Volvo-C40-Recharge-LCA-report.pdf>, S. 26.

61 Ebd., S. 26.

Für Volvo besteht daher das größte Verbesserungspotenzial bei der Reduzierung der Produktions-emissionen. Die Autoren geben zu bedenken, dass ein Großteil der Batterien in Asien, vor allem in China produziert wird. Dort dominiert nach wie vor die Stromerzeugung aus Kohle und ist damit deutlich CO₂-intensiver. Der heutige Strommix innerhalb der EU ist hingegen bereits deutlich CO₂-ärmer, was sich in der Klimabilanz der Fahrzeuge dann widerspiegelt. Daher kommt dem Produktionsstandort (insbesondere der Batterie) und dem dortigen Strommix eine besondere Bedeutung zu.

Allerdings weist der Bericht auf einen weiteren Einflussfaktor bei der Ermittlung der CO₂-Emissionen hin. Die beiden elektrifizierten Modelle C40 Recharge und XC40 Recharge unterscheiden sich hinsichtlich ihrer Masse und verbauten Materialien kaum. Allerdings ist das Modell C40 Recharge in seiner Aerodynamik verbessert. Das Design und die Konstruktion der Autos können die Reichweite und das Gewicht und damit die Lebenszyklus-Emissionen um einige Tonnen reduzieren.

7.8. CO₂-Emissionen: Philippot et al. (2019)

- Philippot et al. (2019), Eco-Efficiency of a Lithium-Ion Battery for Electric Vehicles: Influence of Manufacturing Country and Commodity Prices on GHG Emissions and Costs: February 2019, Batteries 5(1):23, DOI:[10.3390/batteries5010023](https://doi.org/10.3390/batteries5010023).

Vertiefend gehen Philippot et al. in ihrer Studie auf den Einfluss des verwendeten Stroms bei der Batterieherstellung ein. Im Schnitt entfallen ca. 80% der CO₂-Emissionen auf die Zellen der Batterie. Diese Zellen werden zum überwiegenden Teil in Asien, vor allem in China, Japan und Korea gefertigt. Dies führt aufgrund des hohen Anteils der Stromproduktion aus Kohle zu einem bereits deutlich größeren „CO₂-Rucksack“ der asiatischen Batterien.

Sofern die Batterie also aus Asien, insbesondere China kommt, muss das Elektrofahrzeug bereits deutlich mehr Laufleistung aufweisen, um die negativen Klima-Aspekte der Produktion auszugleichen.

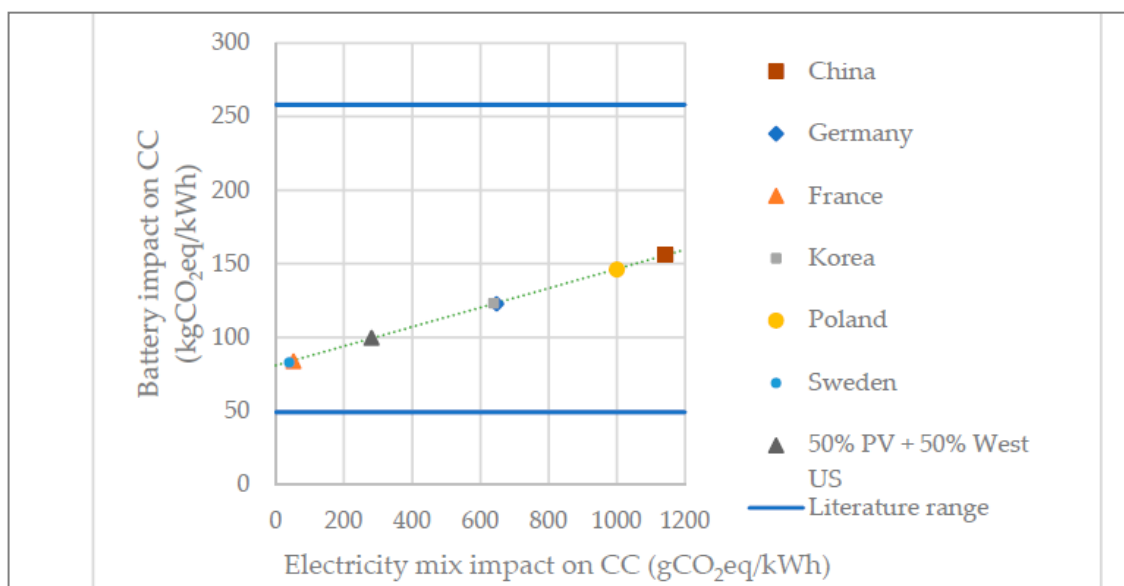


Abbildung 22: GHG emissions of a NCA pack manufactured in several countries⁶²

Allerdings werden von den Autoren weitere wichtige Aspekte der Batterieproduktion hervorgehoben. Neben dem Einsatz von CO₂-ärmeren Strom könnten die Emissionen der Produktion auch durch eine Veränderung der Produktionsvolumen, die Vermeidung und das Recycling von Produktionsabfällen sowie durch eine Erhöhung der Energiedichte positiv beeinflusst werden. So könnten insbesondere Länder mit einem hohen Anteil an fossilen Energieträgern ihre Emissionen deutlich reduzieren.⁶³

7.9. CO₂-Emissionen: Buchal et al. (2019)

- Buchal et al. (2019), Kohlemotoren, Windmotoren und Dieselmotoren – Was zeigt die CO₂-Bilanz?, <https://www.ifo.de/DocDL/sd-2019-08-sinn-karl-buchal-motoren-2019-04-25.pdf>.

Nicht alle Studien kommen jedoch zu einem für die Elektrofahrzeuge positiven Ergebnis. Buchal, et al. konzentrieren sich in ihrer Studie vor allem auf den Strommix im deutschen und europäischen Raum. Dabei kommen die Autoren mit den Daten von 2016 zu dem Ergebnis, dass der nach wie vor hohe Anteil an Kohlestrom und die eher schleppend vorangehende Förderung der erneuerbaren Energien zur Folge hätte, dass die Ökobilanz von BEV momentan sogar eher schlechter ausfalle als von modernen Dieselmotoren. Die Autoren stellen sich gegen die grundlegende Annahme, wonach ausreichend erneuerbare Energien zur Verfügung stehen und die zusätzlichen von den Elektrofahrzeugen benötigten Strommengen abgesichert sind. Es sei davon ausgehen, dass die steigende Nachfrage von Strom durch mehr Elektrofahrzeuge nur dadurch kompensiert werden könne, dass Kohlekraftwerke ihren Betrieb weiter aufrechterhielten. Die Autoren zählen

⁶² Ebd., S. 11.

⁶³ Ebd., S. 12.

eine Vielzahl an Punkten auf, die aus ihrer Sicht in den Makromodellen fehlten, u. a. Ladeverluste an den Ladesäulen und Verbrauch grünen Stroms durch andere Branchen. Durch den Ausbau erneuerbarer Energien entstünden Parallelstrukturen, welche die Strompreise weiter steigen ließen.⁶⁴

Unter Zugrundelegung des deutschen Energiemixes von 2018 ergebe sich schließlich, dass für einen modernen Dieselmotor des Typs OM 654 von Mercedes etwa 141 g CO₂/km zu veranschlagen seien.⁶⁵ Betrachte man hiergegen einen Elektromotor, welcher unter Zugrundelegung des deutschen Strommixes geladen würde, ergebe sich ein CO₂-Ausstoß von etwa 156 – 181 g/km.⁶⁶

Diese Studie stieß auf Kritik⁶⁷, welche die Ersteller der Studie zu weiteren Erläuterungen veranlasste.⁶⁸

7.10. CO₂-Vermeidungskosten: Zapf et al. (2021)

- Zapf, M. et Al. (2021), Kosteneffiziente und nachhaltige Automobile, Bewertung der realen Klimabelastung und der Gesamtkosten – Heute und in Zukunft, Aufl. 2. Springer Vieweg, <https://doi.org/10.1007/978-3-658-33251>.

Die detaillierte Studie von Zapf et al. (2021) gibt einen ausführlichen Überblick zur Berechnung der CO₂-Vermeidungskosten von Fahrzeugen mit unterschiedlichen Antriebssträngen und Verbrauchsannahmen. Allerdings beruhen sämtliche Annahmen auf Werten von 2016, was vor allem die technische Entwicklung von elektrifizierten Fahrzeugen und deren Produktion der vergangenen zwei Jahre nicht berücksichtigt.

Die Autoren entwickeln unterschiedliche Szenarien zu den Preisverläufen von Kraftstoffen in Abhängigkeit zur jeweiligen Art bzw. Herkunft der Antriebsenergie. In Abbildung 23 und Abbildung 24 sind u.a. die CO₂-Vermeidungskosten in Höhe von 274-919 €/tCO₂ (Jahr 2016) und 171-503 €/tCO₂ (Jahr 2030) für PHEV und in Höhe von 229-1704 €/tCO₂ (Jahr 2016) und -78-653 €/tCO₂ (Jahr 2030) für BEV dargestellt.⁶⁹

64 Ebd., S. 9.

65 Ebd., S. 4.

66 Ebd., S. 6.

67 Fraunhofer ISE (2019): Gegendarstellung zur Studie „Kohlemotoren, Windmotoren und Dieselmotoren: Was zeigt die CO₂-Bilanz?“ vom 08.05.2019, <https://www.ise.fraunhofer.de/de/presse-und-medien/news/2019/gegendarstellung-zur-studie-kohlemotoren-windmotoren-und-dieselmotoren.html?fbclid=IwAR3-SRTk-WAkY0i4kJ9UeTGtoUw5NWLXredbxKt68YYqYTN6TrnHN8akqoec>.

68 Reaktion auf Kritiker: Erläuterungen zur Studie „Kohlemotoren, Windmotoren und Dieselmotoren: Was zeigt die CO₂-Bilanz?“ vom 26.04.2019, <https://www.hanswernersinn.de/de/stellungnahme-studie-co2-bilanz-wiwo-26042019>

69 Negativwerte stellen eine jährliche Einsparung gegenüber der Benzin-Referenz dar.

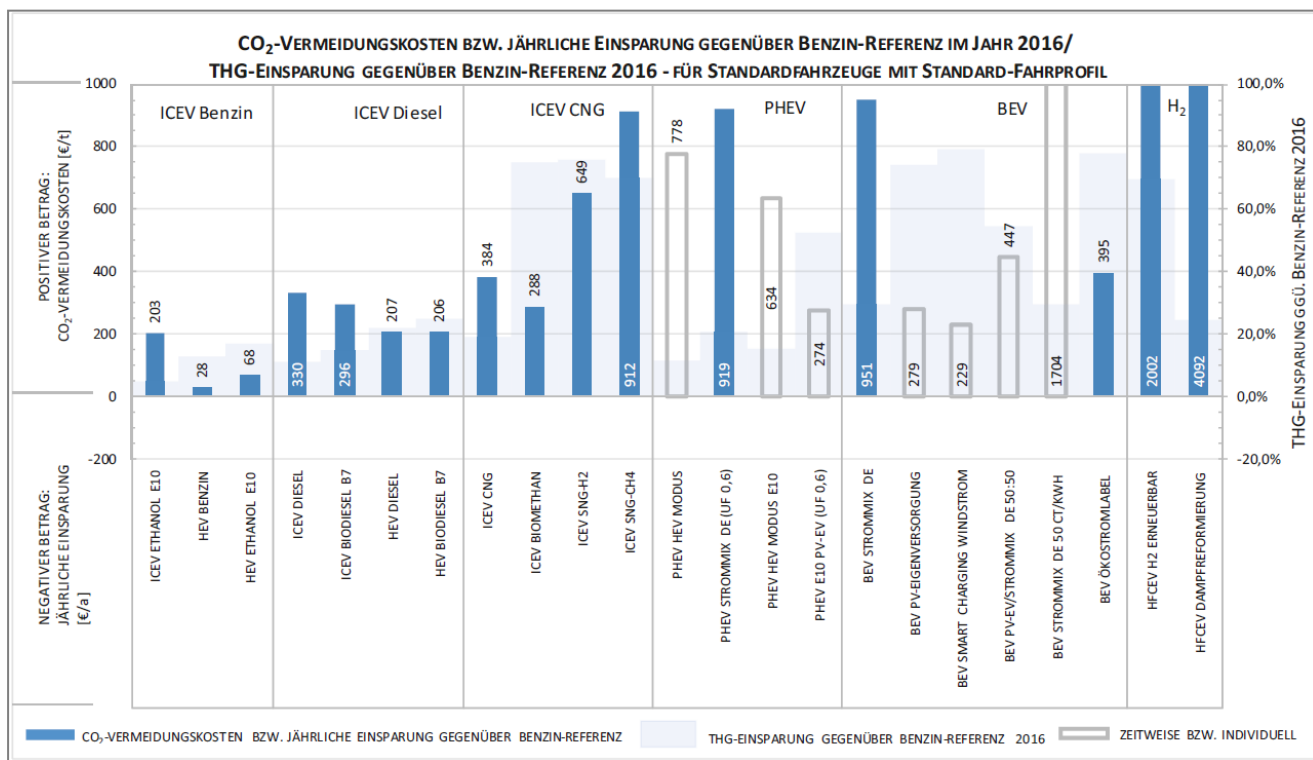


Abbildung 23: CO₂-Vermeidungskosten bzw. jährliche Einsparungen gegenüber Benzin-Referenz im Jahr 2016

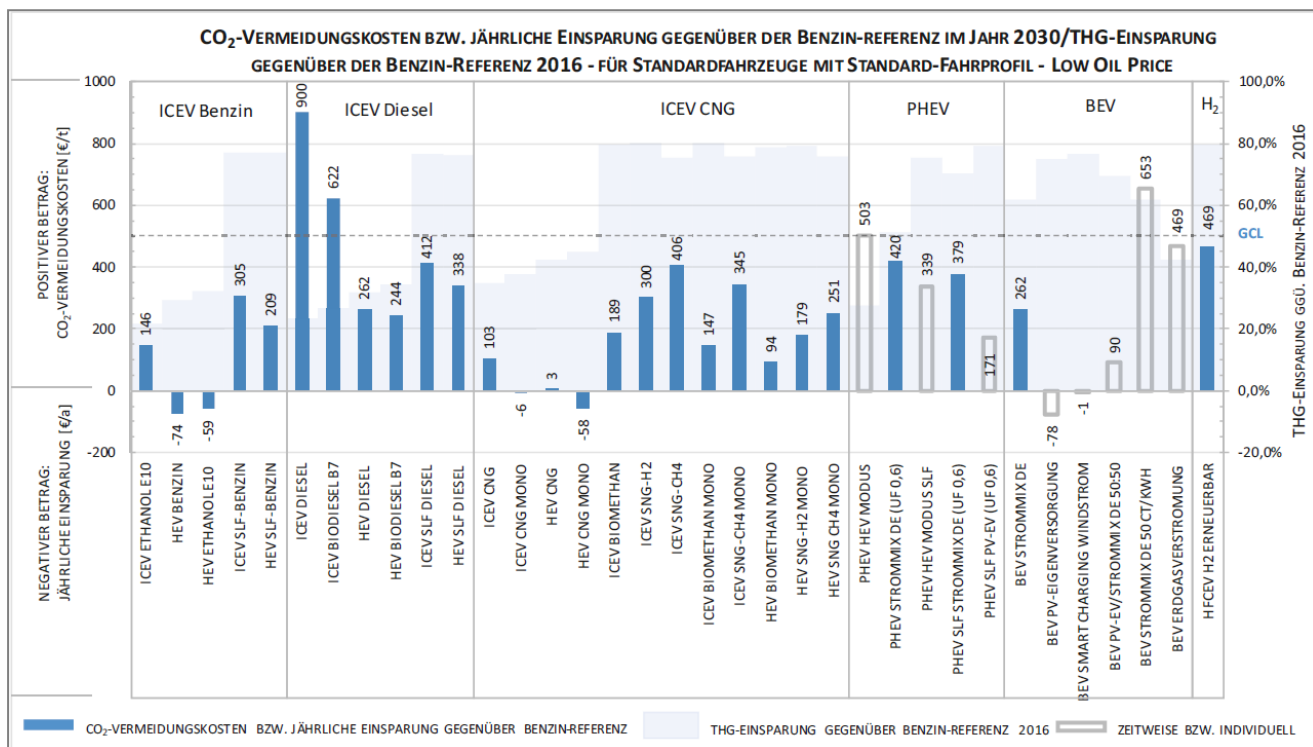


Abbildung 24: CO₂-Vermeidungskosten bzw. jährliche Einsparungen gegenüber Benzin-Referenz im Jahr 2030

7.11. CO₂-Vermeidungskosten: Institut der deutschen Wirtschaft (2019)

- Obermüller, F. et al. (2019), CO₂-Vermeidung im Straßenverkehr, IW-Gutachten, https://www.iwkoeln.de/fileadmin/user_upload/Studien/Gutachten/PDF/2019/Gutachten_CO2-Vermeidung_im_Stra%C3%9Fenverkehr.pdf.

Das Gutachten des Instituts der deutschen Wirtschaft IW betrachtet innerhalb des Verkehrssektors verschiedene Maßnahmen auf Basis der CO₂-Vermeidungskosten. „Förderung batterieelektrischer Fahrzeuge“ wird als eine von insgesamt vier Maßnahmen analysiert und bepreist. Daher stehen weniger die tatsächlichen Verbräuche und CO₂-Emissionen einzelner Fahrzeugklassen und Unterhaltskosten im Fokus, als vielmehr Annahmen zu anfallenden, systemischen Kosten wie Steuermindereinnahmen oder Kosten des Ladeinfrastrukturausbaus aus staatlicher Perspektive. Durch die sektorweite Betrachtung des Verkehrssektors illustriert das Ergebnis der Studie, dass die Projektion möglicher CO₂-Vermeidungsmengen und die damit verbundenen CO₂-Vermeidungskosten elektrifizierter Fahrzeuge im Verhältnis zu anderen Maßnahmen des Sektors eine sehr große Unsicherheit besitzt (aufgrund der Annahmen zum genutzten Strommix, dem Streckenfahrverhalten und der Entwicklung des Energieverbrauchs). Die Autoren errechnen für die Umstellung auf BEV CO₂-Vermeidungskosten zwischen 370 bis 910 €/tCO₂.

7.12. CO₂-Vermeidungskosten: Deutsche Bank Research (2021)

- Deutsche Bank Research (2021), Vorfahrt der E-Mobilität vom Staat teuer erkaufte, Deutschlandmonitor, https://www.dbresearch.com/PROD/RPS_DE-PROD/PROD000000000519520/Vorfahrt_der_E-Mobilit%C3%A4t_vom_Staat_teuer_erkaufte.PDF

Ähnlich argumentiert die Studie von Deutsche Bank Research. Hier wird ebenfalls mit einer volkswirtschaftlichen Perspektive die Maßnahme der Fahrzeugelektrifizierung betrachtet. Maßgeblich schlagen hier steuerliche Mindereinnahmen aufgrund geringerer Energiesteuer auf der Kostenseite durch. Steuereinnahmen aus der CO₂-Steuer sowie aus der Kfz-Steuer fallen weg. Zusätzlich kommt die direkte Förderung von elektrifizierten Fahrzeugen hinzu. Mögliche Steuereffekte für Firmenwagen kämen zusätzlich hinzu. Die Autoren ermitteln anhand der Förderungen von E-Autos und Hybriden einen CO₂-Vermeidungskostensatz von 800-1000€/tCO₂.

8. Schlussbetrachtung

Die oben angeführten Studien kommen bei der Berechnung des CO₂-Emissionsausstoßes bzw. von CO₂-Vermeidungskosten von BEV und PHEV zu unterschiedlichen Ergebnissen.

In der Tendenz attestieren die meisten Studien den BEV einen geringeren CO₂-Ausstoß über den gesamten Lebenszyklus hinweg gesehen als bei einem vergleichbaren Benziner. Mit Ökostrom betriebene BEV stoßen noch einmal weniger CO₂ in der Nutzungsphase aus, als BEV, die mit dem nationalen Strommix gefahren werden. Jedoch sind diverse Einflussfaktoren stark vom individuellen Fahrzeughalter abhängig. Bei den PHEV gehen die Studienaussagen auseinander. Einige Studien messen bei PHEV einen geringeren CO₂-Ausstoß als vergleichbare Verbrenner, aber stellen dennoch die Förderfähigkeit in Frage bzw. sprechen sich für eine Reduktion der Förderätze aus (teilweise in Verbindung mit nachweislichen Fahrleistungen mit dem Elektroantrieb). Andere Studien stellen im realen Fahrverhalten mit PHEV gegenüber Dieselfahrzeugen keine

Minderemission, im Gegenteil, sogar Mehremissionen fest. Es gibt nicht den einen PHEV, vielmehr zeigen die verschiedenen PHEV-Modelle eine hohe Bandbreite an Gesamtgewicht, Stromverbrauch, Batteriekapazität und -gewicht, sowie Motorleistung auf. Einige PHEV weisen sogar einen geringeren Stromverbrauch auf 100 km auf als einige Vollstromer.

Aktuell haben die Rahmenbedingungen der E-Mobilität (Verfügbarkeit von Ladesäulen, die Möglichkeit des Ladens am Hausanschluss, hohe Kraftstoffpreise, Abnahme der „Reichweitenangst“ durch realistische Einschätzung der benötigten Streckenbedarfe) dazu geführt, dass sich die Qualität der BEV-Technologien, die Wirtschaftlichkeit der Produktion und der prognostizierte Absatz von BEV im Verhältnis zu PHEV schneller zugunsten der BEV-Nachfrage vor allem im Privatbereich verschoben hat.⁷⁰

Die Unterschiede in den Ergebnissen der Studien beruhen auf der unterschiedlichen Auswahl und Definition des Lebenszykluses, auf dem jeweiligen zugrunde liegenden Strommix oder aufgrund der Rolle der energieintensiven Produktion von Batterien und den dortigen Produktionsverhältnissen. Hinzu kommt die Vollständigkeit und Aktualität der verwendeten Daten. Technologiefortschritte sind u. a. bei der Fahrzeug- und Batterieproduktion, sowie im Recycling zu beobachten. Die Modellpalette der BEV und PHEV-Hersteller wächst stetig. Stärker als bei den BEV bestimmt bei den PHEV das individuelle Fahr- und Ladeverhalten den CO₂-Ausstoß.

Abbildung 25 fasst die wesentlichen Einflussfaktoren bei der Berechnung der **Emissionen** zusammen (rechter, weißer Bereich). Ergänzt werden die **Kostenfaktoren** für die Berechnung von CO₂-Vermeidungskosten (linker, grauer Bereich).

70 Wissenschaftliche Dienste (2022), Auswirkungen der Elektromobilität auf die Kautschukindustrie, WD 5 - 3000 - 061/22.

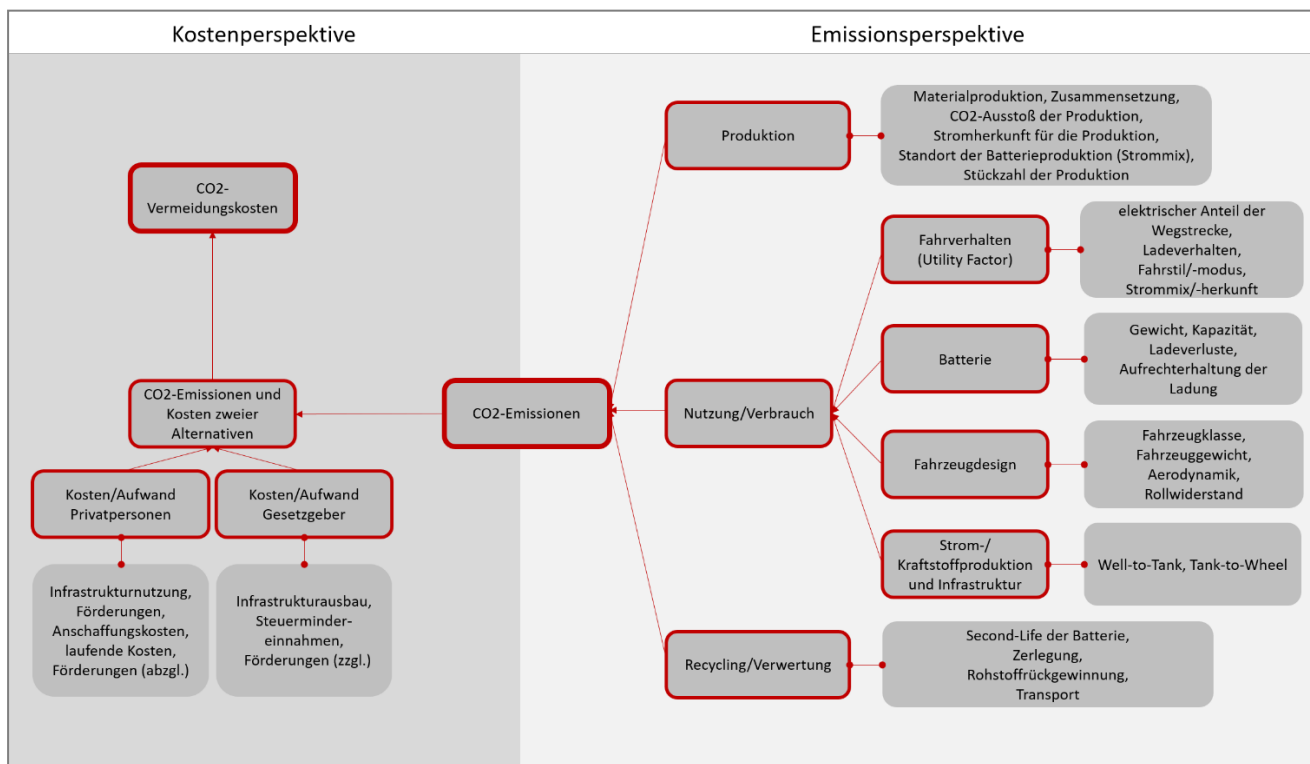


Abbildung 25: Einflussfaktoren auf die CO2-Berechnungen (CO2-Emissionen und CO2-Vermeidungskosten)⁷¹

71 Eigene Darstellung in Anlehnung an Hirz, M.; Nguyen, T.T. Life-Cycle CO2-Equivalent Emissions of Cars Driven by Conventional and Electric Propulsion Systems. World Electr. Veh. J. 2022, 13, 61. <https://doi.org/10.3390/wevj13040061>; Al-Buenain, Ahmad, Saeed Al-Muhannadi, Mohammad Falamarzi, Adeeb A. Kutty, Murat Kucukvar, and Nuri C. Onat (2021), "The Adoption of Electric Vehicles in Qatar Can Contribute to Net Carbon Emission Reduction but Requires Strong Government Incentives" *Vehicles* 3, no. 3: 618-635. <https://doi.org/10.3390/vehicles3030037>.