

# Vergleich des CO<sub>2</sub> Ausstoßes von ICE und BEV Fahrzeugen in Deutschland mit realen Fahrzeugdaten

Peter Helm, 29.1.22

## Zusammenfassung:

Es soll ein CO<sub>2</sub> Vergleich zwischen einem BEV (Battery Electric Vehicle) und einem ICE (Internal Combustion Engine) angestellt werden. Dabei sollen auch die kompletten CO<sub>2</sub> Emissionen der jeweiligen Vorketten betrachtet werden. Bei den CO<sub>2</sub> Emissionen durch die Bereitstellung der elektrischen Energie für ein BEV, sollen dabei real gemessene CO<sub>2</sub> Emissionen zum Ladezeitpunkt über einen Zeitraum von 1,5 Jahren, bzw. 36.000km berücksichtigt werden.

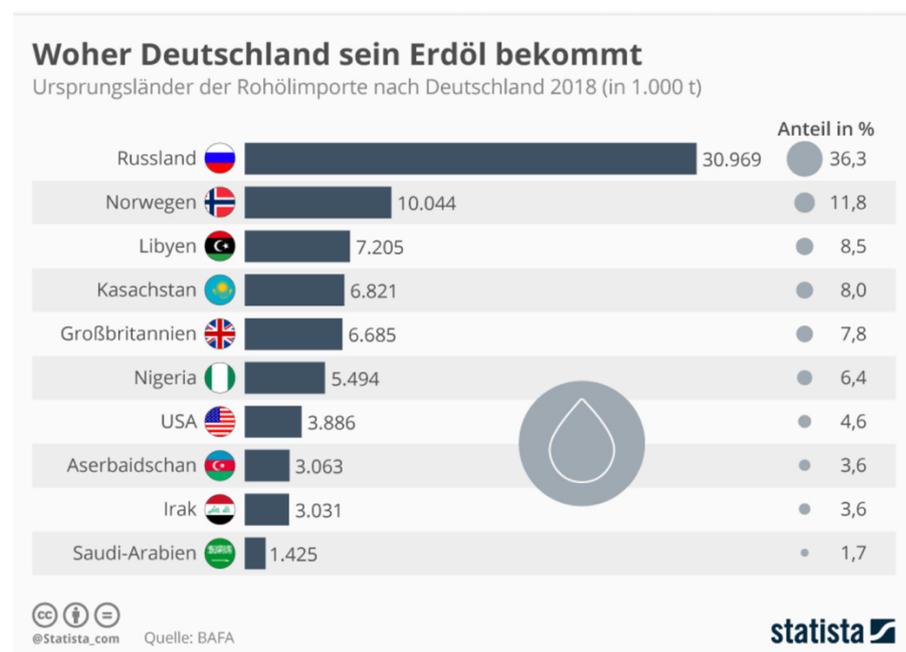
## Betrachtung der CO<sub>2</sub> Emissionen bei der Produktion von Diesel und Benzin.

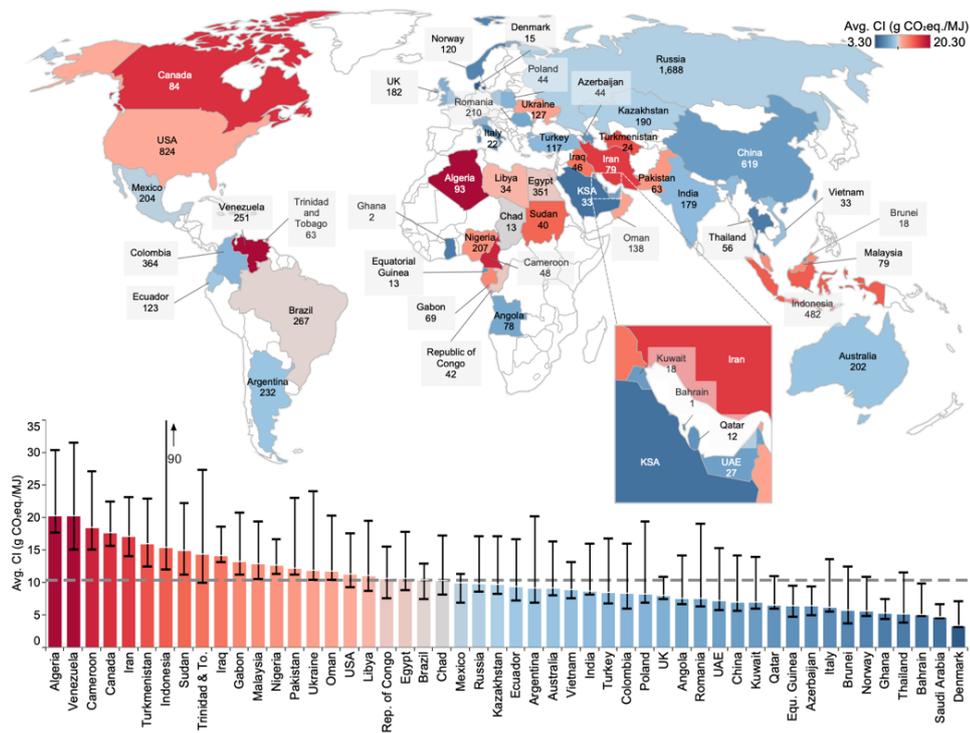
## CO<sub>2</sub> Erzeugung durch die Erdölförderung:

### Die Studie

<https://www.science.org/action/downloadSupplement?doi=10.1126%2Fscience.aar6859&file=aar6859-masnadi-sm.pdf>

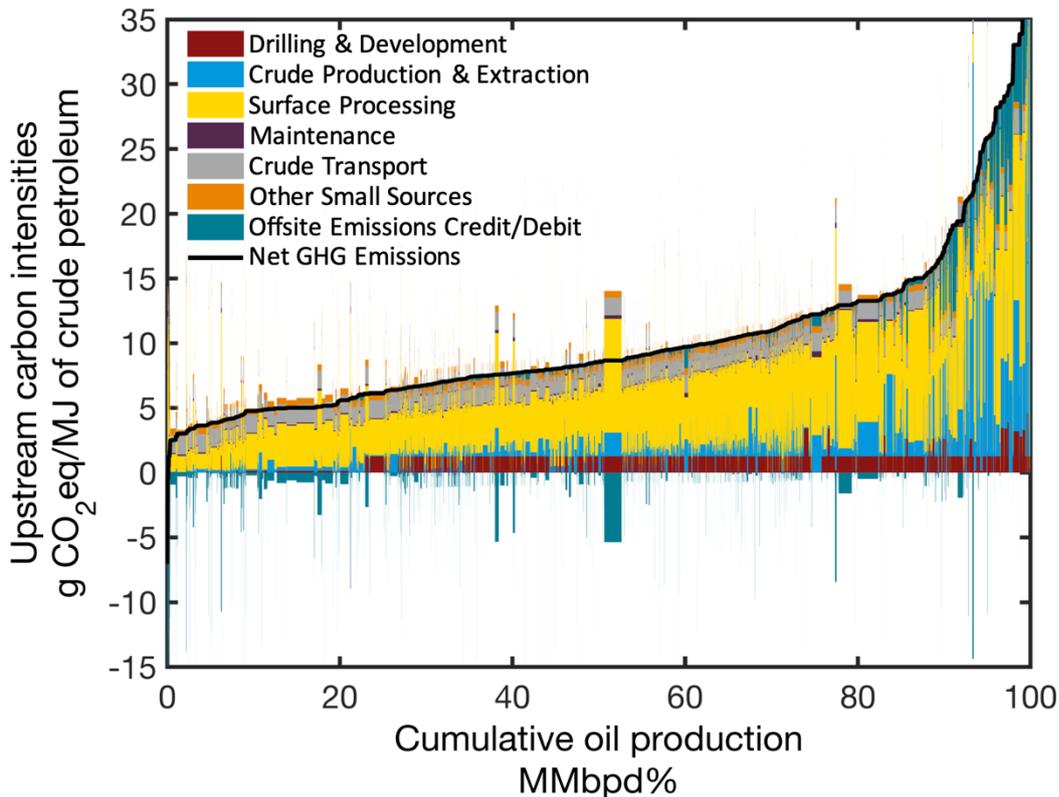
von 2018 zeigt die CO<sub>2</sub> Anteile je nach Ölherkunftsort für die Förderung und Transport bis zur Raffinerie. Dabei schwankt der Wert je nach Ölfeld zwischen 5g CO<sub>2</sub>/MJ (Dänemark) und 20g CO<sub>2</sub>/MJ (Algerien) sehr stark, deshalb muss der tatsächliche Importmix für Deutschland berücksichtigt werden.





**Fig. S22.** Estimated global crude oil upstream carbon intensity (2015): national volume-weighted-average upstream GHG intensities in g CO<sub>2</sub>eq./MJ crude oil delivered to refinery (color) with corresponding error bars (5-95%ile of Monte Carlo simulation to explore the uncertainty associated with missing input data, see SM section 1.7 and 2.4). Map shows number of fields analyzed below each country name. The global volume-weighted CI estimate is shown by the dashed line (~10.3 g CO<sub>2</sub>eq./MJ). Reference year is 2015. Only countries with ≥0.1% of global oil production share are mapped (see the SM Results Data Excel file for full list). Color scheme reflects national volume-weighted-average CI: dark blue for lowest CI, dark red for highest CI.

Es fehlt die CO<sub>2</sub> Emissionen für das Flaring. Die CO<sub>2</sub> Emissionen nehmen mit zunehmender Erschöpfung eines Ölfeldes exponentiell zu.



Ölimportmittelung:

36,3% zu 14g CO<sub>2</sub>/MJ (Mittelwert Russland aus dem angegebenen Unsicherheitsbereich)

11,8% zu 7g CO<sub>2</sub>/MJ

8,5% zu 15g CO<sub>2</sub>/MJ

8,0% zu 14g CO<sub>2</sub>/MJ

7,8% zu 9g CO<sub>2</sub>/MJ

6,4% zu 15g CO<sub>2</sub>/MJ

4,6% zu 14g CO<sub>2</sub>/MJ

3,6% zu 8g CO<sub>2</sub>/MJ

3,6% zu 17g CO<sub>2</sub>/MJ

1,7% zu 7g CO<sub>2</sub>/MJ

Summe 92,3%. 7,7% habe ich bei der Mittelwertbildung nicht berücksichtigt.

Das macht dann im gewichteten Mittel: 11,6 g CO<sub>2</sub>/MJ

Ein kg Öl hat einen Energieinhalt von 42MJ. Bei einer Dichte von 0,9 ergibt das 38MJ/Liter. Wir halten fest, dass pro Liter Rohöl 441g CO<sub>2</sub> durch die Förderung und Transport bis zu den europäischen Raffinerien erzeugt werden.

## CO<sub>2</sub> Erzeugung durch die Raffinierung

Die Studie aus 2020, Schweiz untersucht die CO<sub>2</sub> Abdruck bei den europäischen Raffinerien [https://mdpi-res.com/d\\_attachment/sustainability/sustainability-12-09316/article\\_deploy/sustainability-12-09316-v2.pdf](https://mdpi-res.com/d_attachment/sustainability/sustainability-12-09316/article_deploy/sustainability-12-09316-v2.pdf)

Die Studie vergleicht unterschiedliche Angaben. Für Diesel liegt die Spreizung bei 2,6. Der Mittelwert liegt 6,5g CO<sub>2</sub>/MJ für die Raffinierung von Diesel und 6,9gCO<sub>2</sub>/MJ für die Raffinierung von Benzin.

Diesel hat einen Energieinhalt von 34,7 MJ/Liter.

Das ergibt dann für Diesel 225g CO<sub>2</sub>/Liter Diesel, die bei der Raffinierung erzeugt werden.

Benzin hat einen Energieinhalt von 32MJ/Liter

Das ergibt dann für Diesel 221g CO<sub>2</sub>/Liter Benzin, die bei der Raffinierung erzeugt werden.

Wir halten fest, dass die Vorkette beim Diesel 441gCO<sub>2</sub>/l + 225gCO<sub>2</sub>/l = **666g CO<sub>2</sub>/Liter** und beim Benziner 441gCO<sub>2</sub>/l + 221gCO<sub>2</sub>/l = **662gCO<sub>2</sub>/Liter** erzeugt.

## CO<sub>2</sub> Erzeugung durch die Verbrennung von Diesel und Benzin

Die Verbrennung von 1 Liter Diesel erzeugt 2.650g CO<sub>2</sub>

Die Verbrennung von 1 Liter Benzin erzeugt 2.370g CO<sub>2</sub>

Fehlt noch der Transport von der Raffinerie zur Tankstelle und Förderung in der Tankstelle. Die CO<sub>2</sub> Mengen sind aber vernachlässigbar.

Daraus ergibt sich, dass die Vorkette bei der Dieselpromuktion 25% zusätliches CO<sub>2</sub> und die Vorkette der Benzinpromuktion knapp 28% zusätliches CO<sub>2</sub> erzeugt. Diese zusätliches CO<sub>2</sub> Emissionen werden meist nicht betrachtet.

## Summe

Die Verbrennung von 1 Liter Diesel erzeugt:  $441\text{g/l}+225\text{g/l}+2.650\text{g/l} = \mathbf{3.316\text{g/l CO}_2\text{eq}}$

Die Verbrennung von 1 Liter Benzin erzeugt:  $441\text{g/l}+221\text{g/l}+2.370\text{g/l} = \mathbf{3.032\text{g/l CO}_2\text{eq}}$

Der Durchschnittsverbrauch für ein Benzin ICE beträgt 7,7 Liter und für einen Diesel ICE 7 Liter. <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/484054/umfrage/durchschnittsverbrauch-pkw-in-privaten-haushalten-in-deutschland/>

Ein Diesel PKW, der 7 Liter Diesel auf 100km verbraucht erzeugt **23,2 kg CO<sub>2</sub>eq/100km**

Ein Benzin PKW, der 7,7 Liter Benzin auf 100km verbraucht erzeugt **23,3kg CO<sub>2</sub>eq/100km**

Die durchschnittliche Fahrleistung eines PKW über seine Lebensdauer beträgt 200.000km.

Ein Diesel PKW mit 7l/100km Verbrauch erzeugt dabei **46,4** Tonnen CO<sub>2</sub> durch die Verbrennung von Diesel.

Ein Benzin PKW mit 7,7l/100km Verbrauch erzeugt dabei **46,7** Tonnen CO<sub>2</sub>

## CO<sub>2</sub> Emissionen eines BEV

Ein BEV, wie z.B. das Tesla Model 3, verbraucht für 100km Strecke bei realistischer und vergleichbarer Fahrweise im Jahresmittel rund 19 kWh. Dazu kommen 8% Standverluste, 10% Ladeverluste und 5,7% Netzverluste, das ergibt einen brutto Verbrauch von **23,86 kWh** pro 100km.

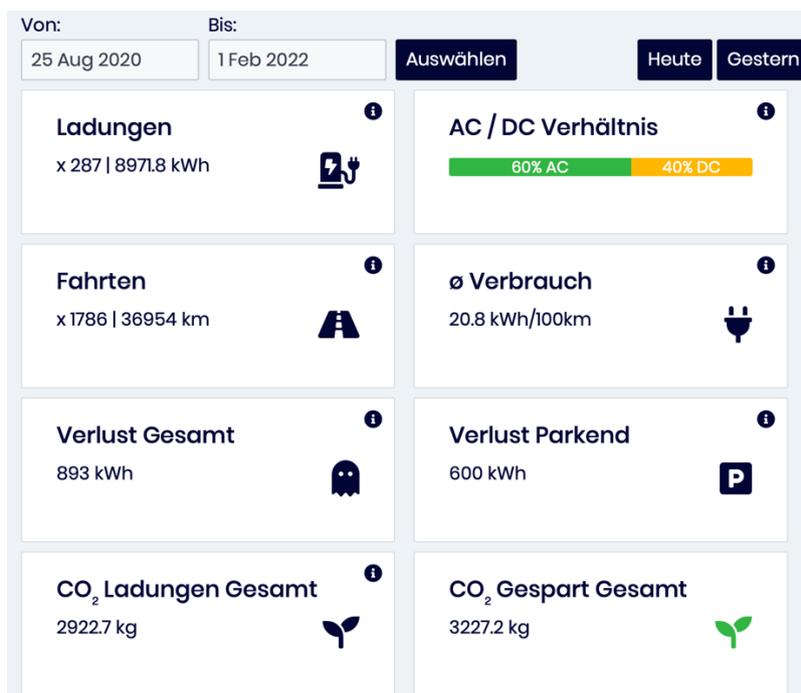
Mein eigenes 2020 Model 3 LR mit überdurchschnittlich hohem 80% Autobahn Anteil (130-140km/h) verbrauchte für 36.500km über 1,5 Jahre, 8775kWh, inklusive Lade-, Standby- und Komfortverluste (Vorklimatisierung, etc.).

Das ergibt 24,0 kWh/100km. Zuzüglich 5,7% Lade- und Netzverluste, ist das ein Gesamtverbrauch von **25,4 kWh/100km**.

Durch bewusste Ladestrategie bezüglich der Verfügbarkeit von EE, liegt mein CO<sub>2</sub>eq pro kWh beim Laden zwischen August 20 und Januar 22 bei **328g/kWh**. Dabei wurde bei der Ermittlung der augenblickliche CO<sub>2</sub>eq Anteil im Strommix auch die nicht direkten Emissionen der einzelnen Energieträger nach IPCC 2014 berücksichtigt (Daten von electricitymap.org).

Durch eine bewusste Bestimmung des Ladezeitpunktes, die große Batterie macht das oft möglich, konnte ich ohne wesentliche Komforteinschränkungen, die CO<sub>2</sub> Emissionen um 24% gegenüber der Durchschnitts CO<sub>2</sub> Intensität von 430g CO<sub>2</sub>eq/kWh reduzieren. Im Wesentlichen habe ich lediglich versucht an windreichen Tagen mit Hilfe von Wetterprognosen zu laden.

Quelle: Tronity Datencloud für mein Tesla M3LR, Dokumentation aller Ladungen, Fahrten und Echtzeit CO<sub>2</sub>eq Strommixberücksichtigung beim Laden. <https://app.tronity.io/dashboard>  
<https://de.wikipedia.org/wiki/Übertragungsverlust>  
<https://app.electricitymap.org/zone/DE>



Screenshot meines Dashboards. Ladungen sind die Bruttoladungen (inkl. Ladeverluste (manuell pro Ladung eingetragen) und der jeweilige CO<sub>2</sub> Intensität zum Ladezeitpunkt, manuelle Dokumentation vor der Funktionseinführung durch Tronity)

Der augenblickliche Strommix in Deutschland lag in 2020 bei 366g CO<sub>2</sub>/kWh, ohne die Vorkettenemissionen.

[https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/171207\\_uba\\_hg\\_braunsteinkohle\\_bf.pdf](https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/171207_uba_hg_braunsteinkohle_bf.pdf)

Unter Berücksichtigung der Vorketten Emissionen, die bei der Stromproduktion anfallen ergibt sich ein CO<sub>2</sub> Mix für 2020 **von 430g CO<sub>2</sub>eq/kWh** (Vorabangabe für 2020 vom UBA per Email). Ich verwende für die weiteren Berechnungen diesen Wert, um einen weitestgehend korrekten Vergleich der beiden Antriebsvarianten zu erhalten.

Für 100km Reichweite erzeugte die benötigte elektrische Energie für ein Model 3 mit 23,86 kWh Bruttoverbrauch auf 100km **10,3kgCO<sub>2</sub>**.

Für 100km Reichweite erzeugte die benötigte elektrische Energie für **mein** BEV im Zeitraum Ende August '20 bis Ende Januar '22 **8,3kg CO<sub>2</sub>**.

Durch den gesetzlich geregelten Ausbau der EE sinkt die erzeugte CO<sub>2</sub> Menge pro kWh elektrischer Energie in den nächsten Jahren und die heutigen BEV werden davon profitieren. Damit verbessert sich die CO<sub>2</sub> Bilanz der heutigen BEV automatisch.

Jahr	g CO <sub>2</sub> Strommix	g CO <sub>2</sub> eq Strommix	Laufleistung pro Jahr km	Brutto Verbrauch in kWh/100km	kWh pro Jahr	kg CO <sub>2</sub> /Jahr	kg CO <sub>2</sub> eq/Jahr
2020	360	430	15.000	23,86	3579	1.288	1.539
2021	390	462	15.000	23,86	3579	1.396	1.653
2022	360	430	15.000	23,86	3579	1.288	1.539
2023	360	430	15.000	23,86	3579	1.288	1.539
2024	350	420	15.000	23,86	3579	1.253	1.503
2025	340	405	15.000	23,86	3579	1.217	1.449
2026	320	375	15.000	23,86	3579	1.145	1.342
2027	300	350	15.000	23,86	3579	1.074	1.253
2028	290	340	15.000	23,86	3579	1.038	1.217
2029	260	305	15.000	23,86	3579	931	1.092
2030	220	264	15.000	23,86	3579	787	945
2031	210	252	15.000	23,86	3579	752	902
2032	200	240	15.000	23,86	3579	716	859
2033	200	240	5.000	23,86	1193	239	286
	<b>Summe</b>		200.000			<b>14.411</b>	<b>17.118</b>

Das Diagramm zeigt die jährliche Durchschnittsfahrleistung, Durchschnittsbruttoverbrauch und die prognostizierte Abnahme des CO<sub>2</sub> Emissionen für die nächsten Jahre. Die CO<sub>2</sub>eq, also mit Berücksichtigung der Vorketten CO<sub>2</sub> Emissionen, wurden anhand der vorliegenden UBA 2020 Daten von mir extrapoliert. Quelle der Prognose:

<https://www.ffe.de/veroeffentlichungen/welchen-strom-tanken-elektroautos-in-zukunft/>

Auf 200.000km erzeugt ein Tesla Model 3 mit 23,86 kWh brutto Verbrauch auf 100km 20,5 Tonnen CO<sub>2</sub> mit dem Strommix von 2020.

Berücksichtigt man ab 2020 die prognostizierten Emissionsverringerungen, ergeben sich 17,1 Tonnen CO<sub>2</sub>eq für 200.000km Fahrleistung in etwas mehr als 13 Jahren bei durchschnittlichen 15.000km Jahresfahrleistung.

Die Differenz des BEV zum Diesel ICE betragen 25,9 Tonnen CO<sub>2</sub> oder 29,3 Tonnen CO<sub>2</sub>eq unter Berücksichtigung des prognostizierten zukünftigen Strommix.

Die Differenz zum Benziner ICE sind 26,2 Tonnen CO<sub>2</sub> oder 29,6 Tonnen CO<sub>2</sub>eq unter Berücksichtigung des zukünftigen prognostizierten Strommix.

Die Differenz von meinem BEV, mit den im Zeitraum August 2020 bis Januar 2021 dokumentierten CO<sub>2</sub> Emissionen mit einer einfachen Hochrechnung auf 200.000km, betragen zum Diesel ICE 30,3 Tonnen CO<sub>2</sub>eq.

## Berücksichtigung des BEV CO<sub>2</sub> Rucksackes durch dessen Produktion

Der zusätzliche CO<sub>2</sub> Rucksack durch die Batterieproduktion beim Tesla Model3 LR aus US Produktion wird auf 5 Tonnen geschätzt. <https://www.mdr.de/wissen/faszination-technik/cozwei-abdruck-der-batterieproduktion-fuer-e-autos-geringer-als-gedacht-100.html>. Andere Quellen gehen von 4,5 Tonnen aus.

<https://docs.google.com/document/d/1xKxQjfhHVAASTWuIypoC8PAO-YPHCm5SKFnaEaufphc/edit>

In der Vergangenheit gab es auch Schätzungen von bis zu 17 Tonnen CO<sub>2</sub> für die Batterieproduktion. Maßgeblich für den CO<sub>2</sub> Rucksack ist der CO<sub>2</sub> Emissionswert der Stromproduktion am Produktionsstandort.

Abgesehen von der Batterie, ist ein BEV weniger CO<sub>2</sub> intensiv in der Produktion als ein ICE Fahrzeug, da der Antrieb weniger energieintensiv in der der Herstellung ist. Deshalb verwende ich die 5 Tonnen CO<sub>2</sub> Angabe als Saldo.

	ICE Diesel	ICE Benzin	BEV M3LR	Mein M3LR	BEV M3 LR zuk. Mix
pro 100km	23,2kg CO <sub>2</sub>	23,3 kgCO <sub>2</sub>	10,3 kg CO <sub>2</sub>	8,3 kg CO <sub>2</sub>	-
in 200.000km	46,4 to	46,7 to	20,5 to	16,6 to	17,1 to
+CO <sub>2</sub> Rucksack	-	-	5 to	5 to	5 to
Saldo 200.000km	46,4 to	46,7 to	25,5 to	21,1 to	22,1 to
Differenz BEV	20,9 to	21,2 to	0 to	-	-
Differenz zuk. BEV	24,3 to	24,6 to	-	-	0 to
Differenz mein BEV	25,3 to	25,6 to	-	0 to	-
g CO <sub>2</sub> pro km	232	233,5	102,5	83	85,5

Die Bilanz meiner Berechnungen und Aufzeichnungen unter Berücksichtigung des BEV CO<sub>2</sub> Rucksacks.

Mit 48 Millionen zugelassen PKW, die auf BEV umgestellt wären, kann man 100MT CO<sub>2</sub> über die PKW-Lebensdauer von 13 Jahren/200.000km einsparen oder 77MT CO<sub>2</sub> pro Jahr. Das sind 12% der Gesamt CO<sub>2</sub> Emissionen in Deutschland. Hierbei ist anzumerken, dass der Verkehrssektor in Deutschland neben der Landwirtschaft, der einzige Sektor ist der bisher keinen nennenswerten Beitrag zur CO<sub>2</sub> Reduzierung geliefert hat.

<https://de.statista.com/statistik/daten/studie/2275/umfrage/hoehhe-der-co2-emissionen-in-deutschland-seit-1990/>

<https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Infografiken/Industrie/treibhausgasemissionen-deutschland-nach-sektoren.html>

Zu beachten ist, dass die BEV Batterie nach 200.000km/13 Jahren i.d.R. noch weiter im BEV oder als stationärer Energiespeicher genutzt werden kann und am Lebensende fast vollständig und energiesparsam recycelt werden kann. Das verbessert die CO<sub>2</sub> Bilanz noch weiter.

[https://www.duesenfeld.com/index\\_de.html](https://www.duesenfeld.com/index_de.html)

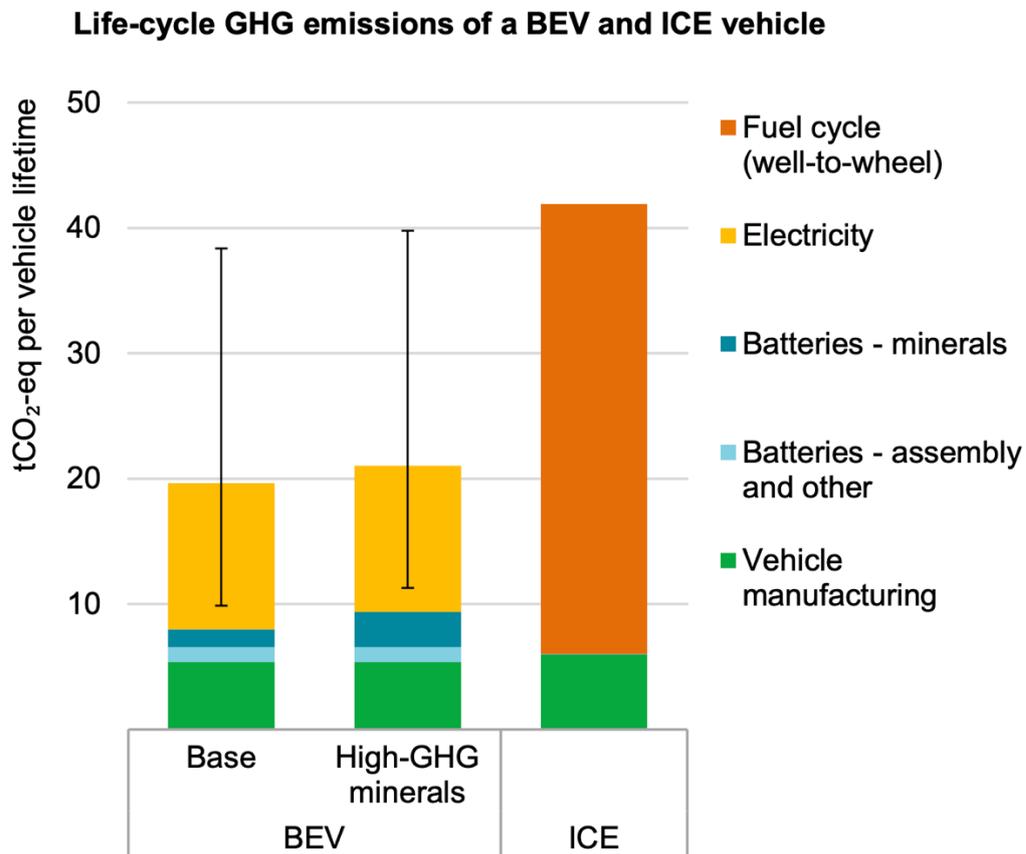
<https://www.oeko.de/fileadmin/oekodoc/Strukturwandel-Second-Life-Batterien.pdf>

## Vergleich zu anderen Studien

Hinweis: Die Vergleichsstudien habe ich erst nachdem ich meine Berechnungen fertiggestellt habe, ermittelt.

Meine Werte für das BEV decken sich mit Untersuchungen von Dr. Messagie <https://www.transportenvironment.org/wp-content/uploads/2021/07/TE%20-%20draft%20report%20v04.pdf>

Meine Berechnungen decken sich mit anderen Studien, z.B., <https://iea.blob.core.windows.net/assets/24d5dfbb-a77a-4647-abcc-667867207f74/TheRoleofCriticalMineralsinCleanEnergyTransitions.pdf>



IEA. All rights reserved.

<https://innovationorigins.com/de/die-herstellung-von-benzin-und-diesel-verursacht-mehr-co2-emissionen-als-wir-dachten/>

## Schlussfolgerung

Wenn man weiß, wie viel CO<sub>2</sub> durch die Abgase emittiert wird, muss man für Benzin 30 % und für Diesel 24 % dazurechnen, um die Gesamtmenge der THG-Emissionen zu ermitteln. Oder, um mit einer anderen Tabelle zu schließen:

### Gesamte CO<sub>2</sub>-Emissionen für Benzin und Diesel

Benzin	3.140 Gramm pro Liter
Diesel	3.310 Gramm pro Liter