

Die Ökobilanz von
Personenkraftwagen

Bewertung alternativer Antriebskonzepte hinsichtlich
CO₂-Reduktionspotential und Energieeinsparung

DIE ÖKOBILANZ VON PERSONENKRAFTWAGEN

***Bewertung alternativer Antriebskonzepte
hinsichtlich CO₂-Reduktionspotential und
Energieeinsparung***

Fritz David
Heinfellner Holger
Lambert Stefan

REPORT
REP-0763

WIEN 2021

Projektleitung Heinfellner Holger

AutorInnen Fritz David
Heinfellner Holger
Lambert Stefan

Lektorat Patricia Erler

Satz/Layout Doris Weismayr

Übersetzung Brigitte Read

Umschlagfoto © zhu difeng – Fotolia.com

Auftraggeber Diese Publikation wurde erstellt im Auftrag des Bundesministeriums für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie, Abteilung II/1 – Mobilitätswende & Digitalisierung

Publikationen Weitere Informationen zu Umweltbundesamt-Publikationen unter:
www.umweltbundesamt.at

Impressum

Medieninhaber und Herausgeber: Umweltbundesamt GmbH
Spittelauer Lände 5, 1090 Wien/Österreich

Diese Publikation erscheint ausschließlich in elektronischer Form auf www.umweltbundesamt.at.

© Umweltbundesamt GmbH, Wien, 2021

Alle Rechte vorbehalten

ISBN 978-3-99004-586-2

INHALTSVERZEICHNIS

ZUSAMMENFASSUNG	5
SUMMARY	8
1 EINLEITUNG	11
2 FAHRZEUGSPEZIFIKATIONEN UND SYSTEMGRENZEN	13
2.1 Fahrzeugkombinationen	13
2.2 Relevante Parameter der Fahrzeugherstellung	14
2.2.1 Grundfahrzeug.....	15
2.2.2 Elektromotor	17
2.2.3 Elektrischer Antriebstrang.....	18
2.2.4 Akkumulator	18
2.2.5 Brennstoffzelle.....	20
2.2.6 Wasserstoffspeicher.....	21
2.2.7 Übersicht Fahrzeugherstellung.....	21
2.3 Relevante Parameter für die Energiebereitstellung	22
2.3.1 Ad-Blue.....	22
2.3.2 Wasserstoff.....	23
2.3.3 Strombasierte flüssige Kraftstoffe.....	24
2.3.4 Übersicht Energiebereitstellung	25
3 ERGEBNISSE	27
3.1 Treibhausgase	27
3.1.1 Lebenszyklusemissionen	27
3.1.2 Emissionen der Herstellung	29
3.1.3 Emissionen bezogen auf Fahrzeugkilometer	30
3.2 Energieeinsatz	33
3.3 Exkurs e-Fuels	35
3.4 Bedeutung der Akkukapazität bei BEV	37
LITERATURVERZEICHNIS	39
ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS	41
ABBILDUNGSVERZEICHNIS	42
TABELLENVERZEICHNIS	43
ANHANG A.1 – ERGEBNISTABELLEN – GESAMTEMISSIONEN	44

ANHANG A.2 – ERGEBNISTABELLEN – SPEZIFISCHE EMISSIONEN JE FAHRZEUGKILOMETER.....	48
ANHANG B – EINGANGSPARAMETER.....	52

ZUSAMMENFASSUNG

Mit der Ökobilanz (oder Lebenszyklusanalyse) werden sowohl die vor- und nachgelagerten (bzw. indirekten) Emissionen bei der Herstellung des Fahrzeugs und des Energieträgers als auch die direkten Emissionen aus dem Fahrbetrieb dargestellt. Damit liefert die Ökobilanz ein umfassendes Bild zur Klimaverträglichkeit verschiedener Antriebsformen nicht nur im Sektor Verkehr, sondern auch in den Sektoren Energie und Industrie im In- und Ausland.

Inhalt der Lebenszyklusanalyse

In der gegenständlichen Lebenszyklusanalyse wurden 39 verschiedene Fahrzeug- und Technologiekombinationen untersucht. Dabei wurden unterschiedliche Antriebstechnologien (ICE, HEV, PHEV, FCEV und BEV), Kraftstoffe (fossil flüssig und gasförmig, synthetisch flüssig, grüner und grauer Wasserstoff, unterschiedliche Stromquellen) und Fahrzeugsegmente (Kleinwagen, Kompaktklasse, Oberklasse) geprüft.

herstellungsbedingte Emissionen

Die herstellungsbedingten Emissionen wurden getrennt für die sechs bedeutendsten Fahrzeugelemente analysiert und in Abhängigkeit von der Technologie aufsummiert:

- Grundfahrzeug (ICE)
- Elektromotor (HEV, PHEV, BEV, FCEV)
- Elektrischer Antriebsstrang und Akkumulator (HEV, PHEV, BEV)
- Brennstoffzelle und Wasserstoffspeicher (FCEV)

Die so ermittelten Emissionswerte unterliegen Schwankungen in Abhängigkeit von den zugrunde gelegten Annahmen und wurden deshalb in Bandbreiten ausgewiesen.

Der größte Hebel zur Vermeidung von Treibhausgasemissionen (THG-Emissionen) liegt dabei in allen Bereichen der Herstellung im eingesetzten Energiemix entlang der Herstellungskette, insbesondere in der Zusammensetzung des eingesetzten Stromes, sowie in der Substitution von Primärrohstoffen durch Rohstoffe, die durch Aufbereitung (Recycling) wiederverwertet werden (Sekundärrohstoffe). Ebenso wurden für die Emissionen aus der Energiebereitstellung Bandbreiten ermittelt, da die diesbezüglichen Emissionen bei Strom, Wasserstoff und strombasierten synthetischen Kraftstoffen teils deutlich variieren können.

BEV mit 100 % Strom aus erneuerbaren Energien erreicht die niedrigsten Emissionen

Die Studie kommt zu dem Ergebnis, dass batterieelektrische Pkw (BEV) bei Einsatz von 100 % Strom aus erneuerbaren Energiequellen in allen Fahrzeugsegmenten die niedrigsten THG-Emissionen verursachen. Die Bandbreite beträgt zwischen rund 50 g CO_{2eq} (Kleinwagen) und 100 g CO_{2eq} (Oberklasse) je gefahrenen Kilometer. Werden BEV mit Strom in der durchschnittlichen österreichischen Zusammensetzung betrieben, erhöhen sich diese Werte auf 86 g CO_{2eq} (Kleinwagen) bis 157 g CO_{2eq} (Oberklasse) je gefahrenen Kilometer.

Ähnlich niedrige Werte wie mit BEV unter Einsatz von 100 % Strom aus erneuerbaren Energiequellen können mit Fahrzeugen erreicht werden, die mit Wasser-

stoff-Brennstoffzelle betrieben werden (FCEV), wenn der erforderliche Wasserstoff via Elektrolyse und ebenfalls unter Einsatz von 100 % Strom aus erneuerbaren Energiequellen generiert wird. Demgegenüber steht jedoch eine geringere Energieeffizienz, wodurch je nach Fahrzeugsegment zwischen 39 % und 83 % mehr Energie je gefahrenen Kilometer eingesetzt werden müssen als im Falle der Direktverstromung, bspw. in einem BEV. Dies ist insbesondere vor dem Hintergrund der angestrebten Klimaneutralität im Verkehr bis 2040 (BKA 2020) und dem damit einhergehenden stark steigenden Bedarf an erneuerbarer Primärenergie von zentraler Bedeutung.

kumulierter Energieaufwand für e-Fuels um Faktor 9–12 höher als bei BEV

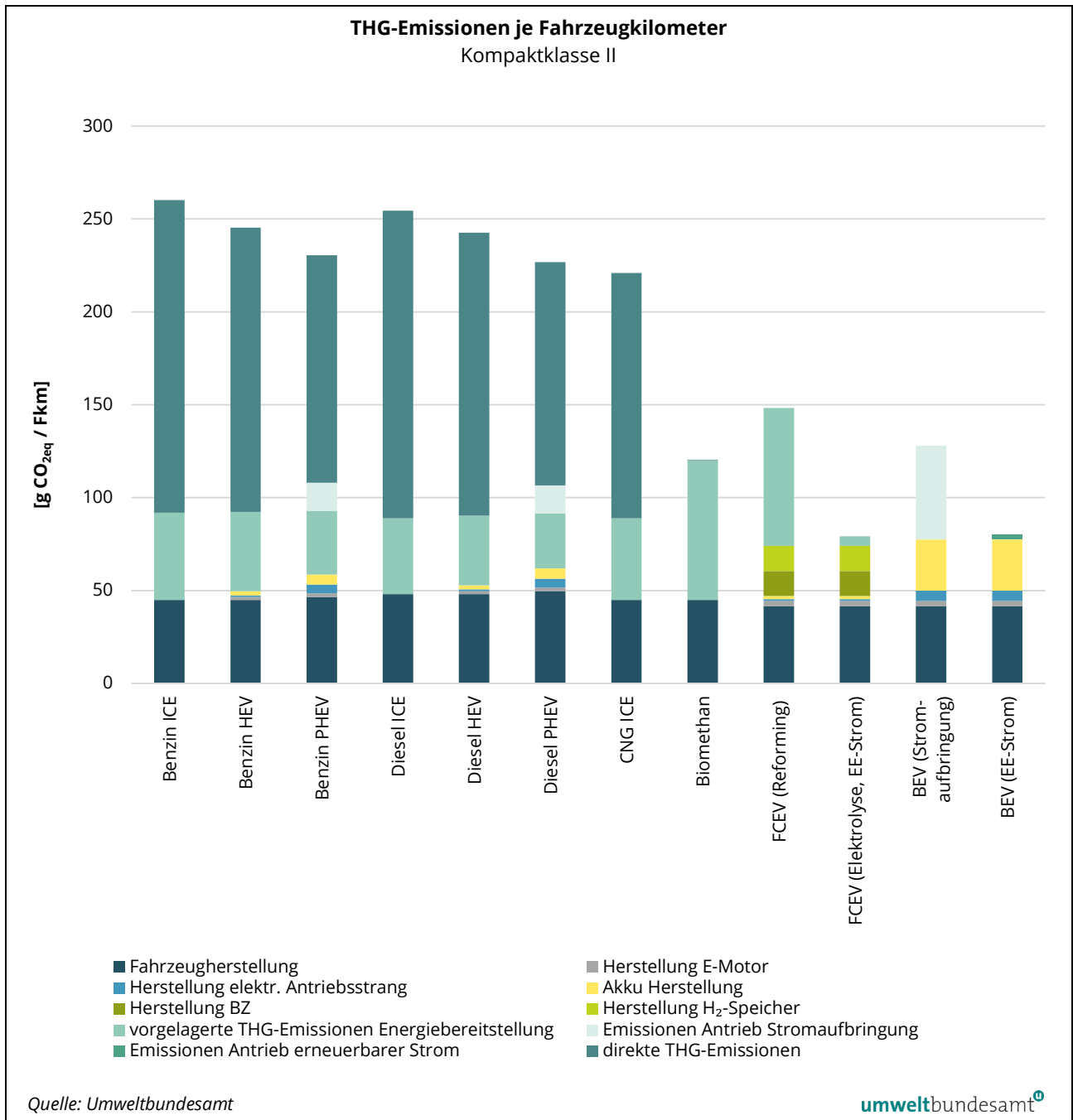
Der Aspekt der anzustrebenden hohen Effizienz im Umgang mit erneuerbarer Energie wird auch den breiten Einsatz von strombasierten flüssigen synthetischen Kraftstoffen im Segment der Pkw limitieren. Selbst wenn für die Herstellung derartiger e-Fuels 100 % Strom aus erneuerbaren Energiequellen und CO₂ aus der Umgebungsluft herangezogen werden, ist der kumulierte Energieaufwand je nach Fahrzeugsegment um den Faktor 9 bis 12 höher als bei BEV. Daher sollte der Einsatz von e-Fuels auf jene Verkehrsmodi und Fahrzeugkategorien fokussiert werden, wo batterieelektrische Antriebe oder brennstoffzellenbasierte Systeme in ihrem Einsatz beschränkt sind (z. B. Flugverkehr).

Darüber hinaus wurde mit der Studie aufgezeigt, dass auch innerhalb der Technologie der batterieelektrischen Fahrzeuge Potenzial zur Reduktion der THG-Emissionen über den Lebenszyklus besteht. So können die THG-Emissionen als Folge der Nutzung eines BEV durch Downsizing und den Einsatz kleinerer Fahrzeuge mit niedrigerem Fahrzeuggewicht und kleineren Akkukapazitäten halbiert werden. Ebenso ist die Qualität des eingesetzten Stroms von entscheidender Bedeutung für die THG-Emissionen von Pkw.

BEV verursachen 67–79 % weniger Emissionen als konventionelle Pkw

Zusammenfassend ergibt sich ein klarer Klimavorteil für batterieelektrische Pkw (BEV), vor allem wenn für die Energiebereitstellung Strom aus erneuerbaren Quellen (etwa nach Umweltzeichen 46) herangezogen wird: Im Vergleich zu einem rein fossil angetriebenen Pkw verursachen BEV je nach Fahrzeugsegment zwischen 67 % (Oberklasse) und 79 % (Kleinwagen) weniger THG-Emissionen. Ähnlich gut schneiden FCEV ab, die allerdings eine wesentlich schlechtere Energieeffizienz als BEV aufweisen.

Abbildung 1: Treibhausgasemissionen je Fahrzeugkilometer in der Kompaktklasse II.



SUMMARY

A life cycle assessment (or life cycle analysis) shows both the upstream and downstream (or indirect) emissions associated with vehicle production and energy sources, and the direct emissions from the use of a vehicle. The life cycle assessment thus provides a comprehensive picture of how sustainable different powertrain systems are in climate terms not only in the transport sector but also in the energy and industry sectors, both in Austria and abroad.

Content of the life cycle analysis

For the life cycle analysis presented in this study, 39 different vehicle and technology combinations have been examined. The analysis included different powertrain technologies (ICE, HEV, PHEV, FCEV and BEV), fuels (fossil fuels - liquids and gas, liquid synthetic fuels, green and grey hydrogen, different sources of electricity) and vehicle segments (small cars, small family/compact cars, luxury/executive cars).

Emissions associated with vehicle production

Emissions related to car production were analysed separately for the six most important vehicle elements and accumulated according to the relevant technology:

- basic vehicle (ICE)
- electric engine (HEV, PHEV, BEV, FCEV)
- electric powertrain and battery pack/accumulator (HEV, PHEV, BEV)
- fuel cell and hydrogen storage (FCEV)

The emissions calculated in this way vary according to the underlying assumptions and are therefore shown in ranges representing the relevant sets of emission values.

The most powerful levers that can avoid greenhouse gas emissions, in all areas of production, are the energy mix used along the production chain, in particular the electricity generation mix, as well as the substitution of primary raw materials with raw materials that can be reused through recycling (secondary raw materials). Ranges of emission values were also determined for emissions from energy supply, as emissions associated with electricity, hydrogen and electricity-based synthetic fuels can vary significantly.

BEVs with 100% renewable electricity achieve the lowest emissions

The study comes to the conclusion that battery electric vehicles (BEVs) produce the lowest greenhouse gas emissions in all vehicle segments when using 100% renewable electricity. Emissions range between around 50 gCO₂eq (small cars) and 100 gCO₂eq (luxury/executive cars) per vehicle kilometre travelled. For BEVs running on the current electricity generation mix in Austria, these values increase to 86 gCO₂eq (small cars) and 157 gCO₂eq (luxury/executive cars) per vehicle kilometre travelled.

Low emissions similar to those from BEV using 100% renewable electricity can also be achieved with fuel cell electric vehicles (FCEV) if the required hydrogen is generated via electrolysis and 100% renewable electricity is used. However, they are less energy efficient, with 39 % and 83 % more energy input per kilometre (depending on the vehicle segment) than for pure electric vehicles such as BEVs.

This is important, especially against the background of carbon neutrality in the transport sector, which Austria aims to reach by 2040 (BKA, 2020), and the strong increase in the demand for renewable primary energy associated with it.

Cumulative energy demand for e-fuels is 9-12 times higher than for BEVs

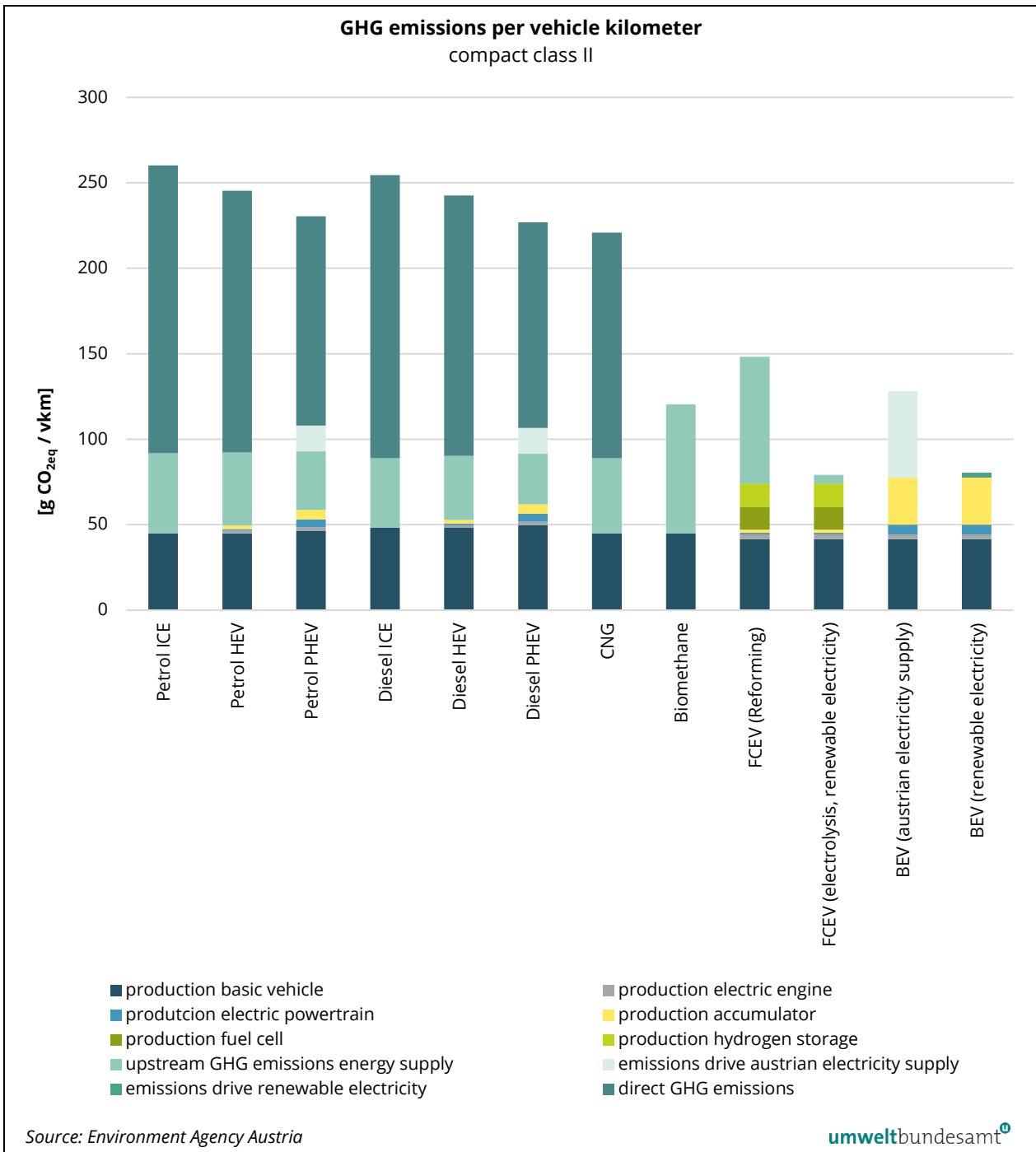
Another aspect is that aiming for high efficiency in the use of renewable energy will limit the widespread use of electricity-based liquid synthetic fuels in the passenger car segment. Even when using 100% renewable electricity and CO₂ from ambient air to produce such e-fuels, cumulative energy consumption is 9 to 12 times higher than with BEVs, depending on the vehicle segment. For the use of e-fuels, one should therefore focus on modes of transport and vehicle categories where the use of battery electric powertrain or fuel cell-based systems is limited (e.g. air traffic).

In addition, the study shows that the technology of battery electric vehicles holds potential for GHG emission reductions over the life cycle. The greenhouse gas emissions resulting from the use of a BEV can be halved by downsizing and using smaller vehicles with a lower weight and smaller battery capacities. The quality of the electricity used is also crucial to reducing greenhouse gas emissions from cars.

Emissions from BEVs are 67% to 79% lower than from conventional cars

In summary, battery electric cars (BEVs) clearly have an advantage when it comes to tackling climate change, especially if they use electricity from renewable sources (e.g. according to Ecolabel 46): compared to purely fossil fuel powered cars and depending on the vehicle segment, the GHG emissions produced by BEVs are 67 % (luxury/estate cars) to 79 % (small cars) lower. Good results are also achieved for FCEVs, although their energy efficiency is significantly lower.

Figure 1: GHG emissions per vehicle kilometer in compact class II.

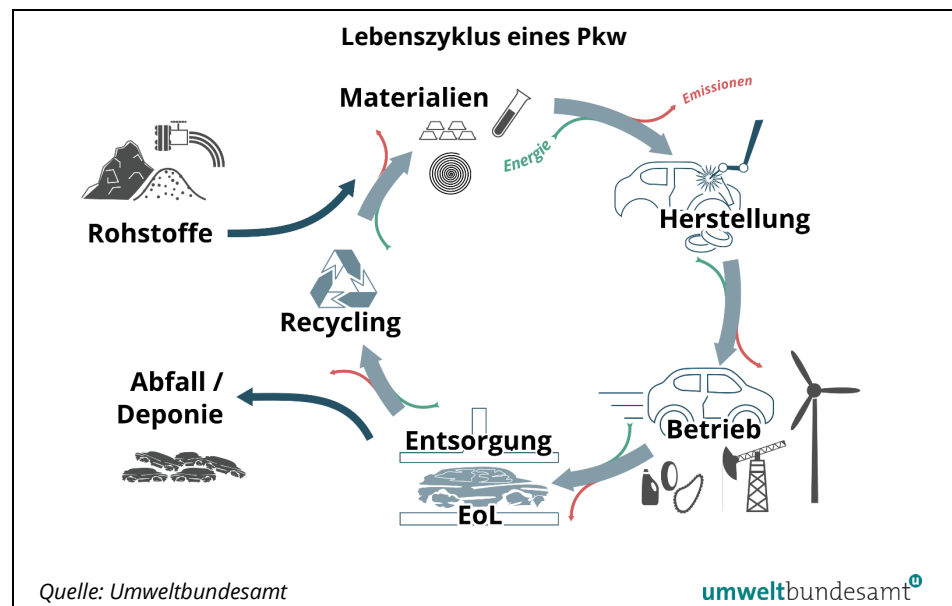


1 EINLEITUNG

Hintergrund Im Jahr 2019 wurden in Österreich 79,8 Mio. Tonnen CO_{2eq} emittiert. Der Verkehrssektor ist davon für 30 % bzw. 24,0 Mio. Tonnen CO₂ verantwortlich (UMWELTBUNDESAMT 2021). Damit zählt der Verkehrssektor zu den Hauptverursachern von THG-Emissionen in Österreich. Vor diesem Hintergrund ist es dringend erforderlich, die THG-Emissionen aus dem Verkehr deutlich zu reduzieren. Für eine Beurteilung der Klimarelevanz von eingesetzten Technologien ist es sinnvoll, eine gesamthafte Betrachtung der Treibhausgas effekte inklusive vorgelagerter Emissionen durchzuführen.

LCA für eine ganzheitliche Betrachtung Die Frage nach der Klimaverträglichkeit von (alternativen) Antriebsformen und Kraftstoffen wird im Rahmen dieser Studie daher nicht nur im Sektor Verkehr in Österreich, also als Folge der direkten Emissionen aus dem Fahrbetrieb vor Ort, sondern auch hinsichtlich der vorgelagerten Emissionen in den Sektoren Energie und Industrie im In- und Ausland dargestellt. In der Lebenszyklusanalyse (oder Ökobilanz) werden die dort entstehenden vor- und nachgelagerten (bzw. indirekten) Emissionen ergänzend zu den direkten Emissionen aus dem Fahrbetrieb bilanziert. Vor- und nachgelagerte Emissionen entstehen dabei entlang der gesamten Wertschöpfungskette, also vom Abbau der Rohstoffe über die Fertigung und Montage des Fahrzeuges bis hin zum Recycling der einzelnen Fahrzeugkomponenten.

Abbildung 2:
Lebenszyklus eines Pkw.



Vorarbeiten Das Umweltbundesamt erstellt in regelmäßigen Abständen Lebenszyklusanalysen, um die ökologischen Auswirkungen von elektrischen Antrieben (BEV, FCEV) mit konventionellen (ICEV) und alternativen Antrieben (HEV, PHEV, Biomethanfahrzeuge etc.) im Segment der Personenkraftwagen (Pkw) zu vergleichen. Die letzte Veröffentlichung stammt aus dem Jahr 2018 (UMWELTBUNDESAMT 2018).

Zunahme der Akku-Kapazität Rein batterieelektrische Pkw, die seit 2018 in den Markt eingeführt wurden, weisen in allen Fahrzeugsegmenten (auch aufgrund dynamisch fallender Kosten für die Batteriezellen) teilweise signifikant höhere Batteriekapazitäten auf (2018: durchschnittlich 36 kWh). In der Oberklasse werden Kapazitäten von bis zu 95 kWh verbaut. Auch Elektrofahrzeuge der Kompaktklasse verfügen mittlerweile über Akkus mit einer Kapazität von bis zu 75 kWh. Entsprechend der dynamischen Entwicklung der Technologie und des Fahrzeugmarktes – im Jahr 2020 waren bereits 6,4 % aller neu zugelassenen Pkw BEV (STATISTIK AUSTRIA 2021) – werden auch kontinuierlich neue Forschungsergebnisse über Umweltauswirkungen, insbesondere auf das Klima, von Herstellungsprozessen veröffentlicht und breit diskutiert.

neue Studienelemente In dieser Studie werden die direkten und indirekten THG-Emissionen für unterschiedliche Antriebstechnologien und alternative Kraftstoffe, differenziert nach Fahrzeugsegment, analysiert und dargestellt. Ein besonderer Fokus wird dabei auf die Emissionen als Folge der Herstellung insbesondere von Karosserie, Akku, (E-)Motor sowie Brennstoffzelle und Wasserstoffspeicher gelegt. Eine umfassende Untersuchung der Klimawirkung erfolgt durch Variation wesentlicher Parameter der Herstellungskette mittels Sensitivitätsanalyse. Eine weitere Neuerung im Vergleich zu den Vorarbeiten ist die Inklusion strombasierter flüssiger Kraftstoffe für Verbrennungskraftmaschinen (e-Fuels).

2 FAHRZEUGSPEZIFIKATIONEN UND SYSTEMGRENZEN

2.1 Fahrzeugkombinationen

Unterscheidung von 4 Fahrzeugsegmenten

In der vorliegenden Studie wurden unterschiedliche Fahrzeugsegmente (Größenklassen von Pkw) untersucht. Die vier ausgewählten Segmente werden in nachfolgender Tabelle 1 aufgelistet und abgegrenzt.

Tabelle 1:
Untersuchte Fahrzeugsegmente.

	Fahrzeugleergewicht exkl. Traktionsbatterie [kg]	BEV Batterie- kapazitäten [kWh]
Kleinwagen	< 1.300	25
Kompaktklasse I	1.300–1.600	50
Kompaktklasse II	1.300–1.600	75
Oberklasse	> 1.600	100

14 technologische Optionen

Jedes dieser Fahrzeugsegmente wurde im Hinblick auf folgende Technologien und Kraftstoffe¹ untersucht:

Tabelle 2:
Untersuchte Kraftstoffe
und Antriebstechnologien.

ICE	Ottomotor (mit fossilem Kraftstoff)
	Ottomotor (mit synthetischem Kraftstoff – e-Fuel)
	Ottomotor HEV
	Ottomotor PHEV
	Dieselmotor (mit fossilem Kraftstoff)
	Dieselmotor (mit synthetischem Kraftstoff – e-Fuel)
	Dieselmotor HEV
	Dieselmotor PHEV
	Ottomotor CNG (Erdgas)
	Ottomotor Biomethan
FCEV	mit fossilem H ₂ aus Reforming
	mit H ₂ aus erneuerbarer Energie mittels Elektrolyse
BEV	mit Strom aus durchschnittlicher österreichischer Aufbringung
	mit erneuerbarem Strom

¹ Für Ottokraftstoffe wurde ein beigemischter Anteil von rd. 5 % Ethanol und für Dieselmotoren von rd. 7 % Biodiesel angenommen.

**Analyse von 39
Kombinationen**

Im Segment der Kleinwagen wurden mangels gegenwärtigen und zukünftig zu erwartenden Angebots die Optionen Dieselmotor HEV und PHEV sowie FCEV nicht berücksichtigt. Kompaktklasse I und Kompaktklasse II unterscheiden sich durch die verbaute Batteriekapazität bei BEV. Somit ergeben sich in Summe 39 unterschiedliche Fahrzeug- und Technologiekombinationen, die im Rahmen dieser Studie untersucht wurden.

**zugrunde gelegte
Parameter**

Allen untersuchten Fahrzeugen wird eine Lebensdauer von 15 Jahren bei einer durchschnittlichen Jahresfahrleistung von 15.000 km zugrunde gelegt. Die Fahrleistung über den gesamten Lebenszyklus eines Fahrzeuges summiert sich auf 225.000 km. Bei BEV wird zudem davon ausgegangen, dass diese Fahrleistung mit einer einzigen Batterie erbracht wird. Bei PHEV wurde, basierend auf Auswertungen der Realverbrauchsdatenbank www.spritmonitor.de, durch das Autorenteam ein elektrischer Fahrleistungsanteil von 30 % zugrunde gelegt.

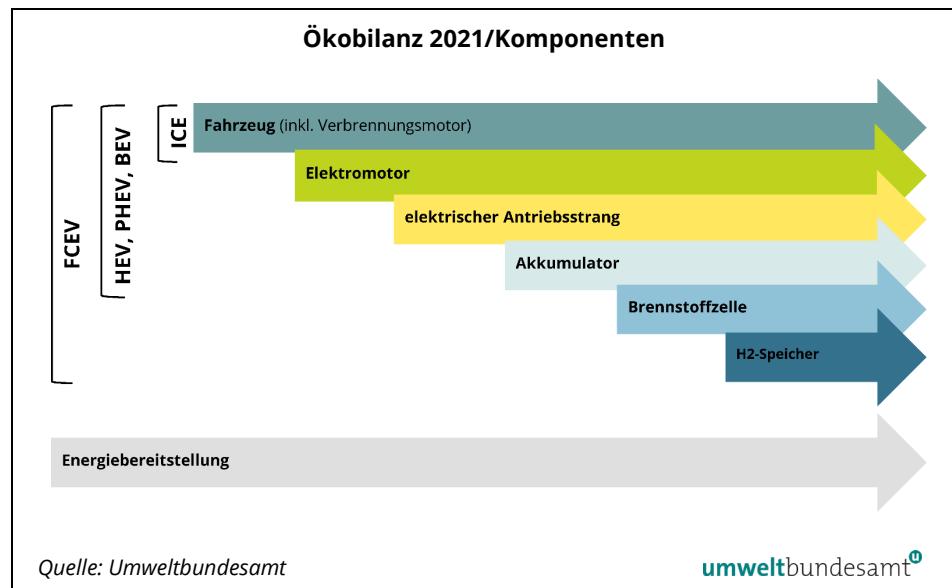
2.2 Relevante Parameter der Fahrzeugherstellung

**6 Elemente
bestimmen die
Emissionen der
Herstellung**

Für die Berechnung der THG-Emissionen aus der Fahrzeugherstellung sind je nach Antriebstechnologie folgende Parameter von besonderer Bedeutung:

- **Grundfahrzeug** in kg: Hier wird das Fahrzeuggewicht angegeben, wobei bei Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor (ICE) das gesamte Fahrzeug (inkl. Motor und Antriebsstrang, Karosserie, Reifen, Elektronik, etc.) analysiert wird. Bei (teilweise) alternativ angetriebenen Fahrzeugen sind die entsprechenden Antriebselemente (Elektromotor und Akku bzw. Brennstoffzelle und Wasserstoffspeicher) nicht im Grundfahrzeug berücksichtigt, sondern werden in den nachfolgenden Parametern bilanziert.
- **E-Motor** in kW: Die Leistung des Elektromotors ist u. a. abhängig von bzw. steigt mit der Fahrzeugklasse.
- **Elektrischer Antriebsstrang** in kg: Hier werden die Bestandteile des Antriebsstranges von elektrisch betriebenen Fahrzeugen zusammengefasst. Dazu zählen Konverter, Ladekabel inkl. Ladegerät, Inverter und Stromverteiler.
- **Akku** in kWh: Es wird ein Lithium-Ionen-Akku mit Metalloxid-Kathode betrachtet. Dazu wurde die Annahme getroffen, dass die Herstellung der Batterie in Asien erfolgt, es wird ein fiktiver Strommix (Mischung der Stromproduktionsversorgung der Länder China, Japan und Südkorea) herangezogen.
- **Brennstoffzelle** in kW: Die Leistung der Brennstoffzelle ist u. a. abhängig von der Fahrzeugklasse. Als Katalysator wird eine Protonenaustauschmembran mit Platin als wichtigster Vertreter der Gruppe der Platinmetalle (PGM) herangezogen.
- **Wasserstoffspeicher** in kg: Es wird ein 700 bar Typ 4 Speicher mit Kohlefaserummantelung bilanziert.

Abbildung 3:
Wichtigste Elemente zur
Bilanzierung der
herstellungsbedingten
Emissionen.



Die einzelnen treibhausgasrelevanten Teile bzw. Parameter der Fahrzeuge sowie die Antriebsenergie werden im Folgenden detailliert beschrieben. Dabei werden die jeweils eingesetzten Materialien und ihre Herstellungsketten sowie der Energieeinsatz in Form von Strom und Prozesswärme bzw. Dampf bei der Montage der Bauteile berücksichtigt.

2.2.1 Grundfahrzeug

umfasste Bestandteile

Der Parameter Grundfahrzeug umfasst insbesondere das Chassis, die Karosserie, die Bereifung, das Interieur und im Falle des ICE auch den Motor mit allen zugehörigen Elementen sowie auch die Abgasanlage. Obwohl eine Auflistung der eingesetzten Materialien eines Pkw immer mit einigen Unsicherheiten bzw. Variationen verbunden ist, lässt sich die Materialliste für einen durchschnittlichen Pkw mit einer Beispielmasse von 1.500 kg unabhängig von der Antriebstechnologie wie folgt zusammenfassen (FERNANDO et al. 2020, GEMIS 2021; siehe Tabelle 3).

Tabelle 3:
Materialliste eines
durchschnittlichen Pkw
mit Beispielmasse
1.500 kg

Material	Masse in kg
Stahl (verschiedene)	700
Eisen	75
Kunststoffe	200
Glas	30
Gummi	60
Aluminium	200
Kupfer	15
Flüssigkeiten	70

Material	Masse in kg
PGM ²	< 1
Elektr. Bauteile	5
Andere Bestandteile (z. B. Lacke, Holzverbauten, Leder etc.)	150
Summe	rd. 1.500

Quelle Umweltbundesamt

**Hauptbestandteil
eines jeden Pkw ist
Stahl**

Mit über 50 % den größten Anteil am Fahrzeuggewicht haben Stahl und Eisen. Nennenswerte Anteile (über 10 % des Gesamtgewichtes) entfallen darüber hinaus auf Aluminium, Kunststoffe und andere Bestandteile. PGM wird bei ICE in der Abgasnachbehandlung eingesetzt, spielt jedoch massenmäßig nur eine untergeordnete Rolle. Kunststoffe werden bei der Innenverkleidung und Gummi in den Reifen eingesetzt.

Werden nun die entsprechenden Emissionsfaktoren zur Gewinnung und Veredelung des jeweiligen Materials herangezogen, können die THG-Emissionen des Materialeinsatzes berechnet werden. Für die Berechnung der gesamten THG-Emissionen aus der Fahrzeugherstellung muss ergänzend dazu noch der Energieeinsatz zur Herstellung und zum Zusammenbau der einzelnen Elemente des Fahrzeuges berücksichtigt werden. Der Energieeinsatz der Karosserieherstellung je kg Gewicht beträgt für alle Pkw rund 2 kWh Strom sowie 0,6 kWh an Prozessenergie (ECOINVENT 2021). Bei ICE kommen zusätzlich 2 kWh an Strom sowie 0,6 kWh an Prozessenergie je kg Gewicht für das Montieren und Zusammensetzen des Verbrennungsmotors sowie des Abgassystems hinzu.

**Ø Emissionsfaktor
ICE, HEV, PHEV:
7,2 kg CO_{2eq} je kg
Fahrzeuggewicht**

Aus diesen Werten ergibt sich für ICE ein Emissionsfaktor von **7,2 kg CO_{2eq} je kg Fahrzeuggewicht**. Diesem Wert liegt die Annahme zugrunde, dass das Fahrzeug in Europa produziert wird und der verwendete Strom dem durchschnittlichen europäischen Stromproduktionsmix entspricht. Durch den Einsatz von Sekundärmaterialien³ und Strom aus erneuerbaren Energiequellen lässt sich dieser Emissionsfaktor nochmals deutlich auf einen Wert von 2,9 kg CO_{2eq} je kg Pkw reduzieren. Wird umgekehrt Strom aus vorwiegend fossilen Energieträgern bezogen, erhöht sich der Emissionsfaktor auf bis zu 8,5 kg CO_{2eq} je kg Pkw.

**Ø Emissionsfaktor
BEV, FCEV:
6,2 kg CO_{2eq} je kg
Fahrzeuggewicht**

Für alternativ angetriebene Pkw (FCEV und BEV) wird neben den eingesetzten Materialien ausschließlich der Energieeinsatz zur Herstellung der Karosserie betrachtet. Zusätzlich gibt es kleine Unterschiede bei den Materialien, z. B. wird kein PGM in der Karosserie eines BEV oder FCEV verwendet. Für die Karosserieherstellung von BEV oder FCEV ergibt sich somit ein Emissionsfaktor von **6,2 kg CO_{2eq} je kg Fahrzeuggewicht**, wenn die Fahrzeugherstellung (Karosserie) mit einem europäischen Strommix bilanziert wird. Hier liegt die Schwankungsbreite zwischen 2,7 kg CO_{2eq} je kg Pkw und 7,0 kg CO_{2eq} je kg Pkw. Dieser

² Gruppe der Platinmetalle, engl. Platin Group Metals (kurz: PGM)

³ Sekundärmaterialien werden durch Aufbereitung bzw. Recycling (z. B. aus Altmetallen) wiederverwendet.

Emissionsfaktor umfasst nicht die Herstellung des Akkus, des Elektromotors, der Brennstoffzelle bzw. des Wasserstoffspeichers (siehe nachfolgende Kapitel).

Tabelle 4:
Emissionen aus der
Herstellung des
Grundfahrzeuges.

	Emissionen aus der Herstellung des Grundfahrzeuges [kg CO _{2eq} /kg Fzg]		
	Best Case	verwendet	Worst Case
Pkw mit VKM	2,9	7,2	8,5
BEV, FCEV	2,7	6,2	7,0

Quelle Umweltbundesamt

2.2.2 Elektromotor

Die THG-Berechnung der Herstellung eines Elektromotors folgt dem Zugang für die Bilanzierung des Grundfahrzeuges: Es werden die verwendeten Materialien, inkl. Vorkette (siehe Kapitel 2.2.1) sowie der Energieeinsatz bei der Produktion des Motors (die Montage bzw. Fertigung) berücksichtigt.

Materialeinsatz eines E-Motors

Ø Emissionsfaktor:
4,5 kg CO_{2eq} je kW
Leistung

Die wichtigsten Materialien eines Elektromotors zum Antrieb eines Pkw sind Aluminium, Kupfer, Stahl und der Neodym-Eisen-Bor Magnet, wie er derzeit noch in der überwiegenden Zahl der verfügbaren Fahrzeugmodelle verbaut wird. Darüber hinaus sind für die herstellungsbedingten THG-Emissionen auch elektronische Bauteile, wie beispielsweise Widerstände und Leiterplatten, von Bedeutung. Bei zusätzlicher Berücksichtigung des Energieeinsatzes für die Herstellung eines Elektromotors mit 100 kW Leistung und einem Gesamtgewicht von knapp über 50 kg (ECOINVENT 2021) entstehen so durchschnittlich rund 450 kg an gesamten THG-Emissionen bzw. **4,5 kg CO_{2eq} je kW Leistung** bei der Produktion. Dem liegt die Annahme zugrunde, dass der Elektromotor in Europa und auf Basis der durchschnittlichen europäischen Stromzusammensetzung produziert wird und ausschließlich Primärmaterialien⁴ zum Einsatz kommen.

Wesentlicher Einfluss kann auch hier wieder durch den Einsatz von Sekundärmaterialien und erneuerbarem Strom bei der Montage genommen werden. Dadurch kann der beschriebene Emissionsfaktor für die Herstellung des Elektromotors im Idealfall auf rund 1,7 kg CO_{2eq} je kW Leistung reduziert werden. Beim Einsatz einer (fiktiven) Stromzusammensetzung als Mischung der Länder China, Japan und Südkorea kann sich der Emissionsfaktor umgekehrt auf 4,6 kg CO_{2eq} je kW Leistung erhöhen.

Tabelle 5:
Emissionen aus der
Herstellung des
Elektromotors.

	Emissionen aus der Herstellung des Elektromotors [kg CO _{2eq} /kW Leistung]		
	Best Case	verwendet	Worst Case
Pkw mit E-Motor	1,7	4,5	4,6

Quelle: Umweltbundesamt

⁴ Unter Primärmaterialien werden Materialien verstanden, deren Ausgangsstoffe aus natürlichen Ressourcen bestehen, z. B. Eisenerz für die Stahlproduktion.

2.2.3 Elektrischer Antriebsstrang

**Ø Emissionsfaktor:
42 kg CO_{2eq} je kg
Antriebsstrang**

Der elektrische Antriebsstrang umfasst spezifische Bauteile für Fahrzeuge mit Bauteilen für einen (teil)elektrischen Antrieb. Dazu zählen insbesondere Konverter, Inverter, Bordnetzladewandler und Stromverteiler. Bei BEV und PHEV sind zusätzlich noch das Ladekabel inkl. Ladegerät zu berücksichtigen. Bei einem durchschnittlichen BEV summieren sich diese Teile auf 27 kg. Mit den Informationen aus ECOINVENT (2021) lässt sich so ein Emissionsfaktor von rund **42 kg CO_{2eq} je kg Antriebsstrang** ableiten.

Die Angabe einer Bandbreite ist im Bereich des Antriebsstranges einerseits aufgrund des geringen Beitrages zu den gesamten THG-Emissionen und andererseits aufgrund der Unsicherheiten im verfügbaren Datenmaterial nicht sinnvoll und wurde an dieser Stelle ausgespart.

2.2.4 Akkumulator

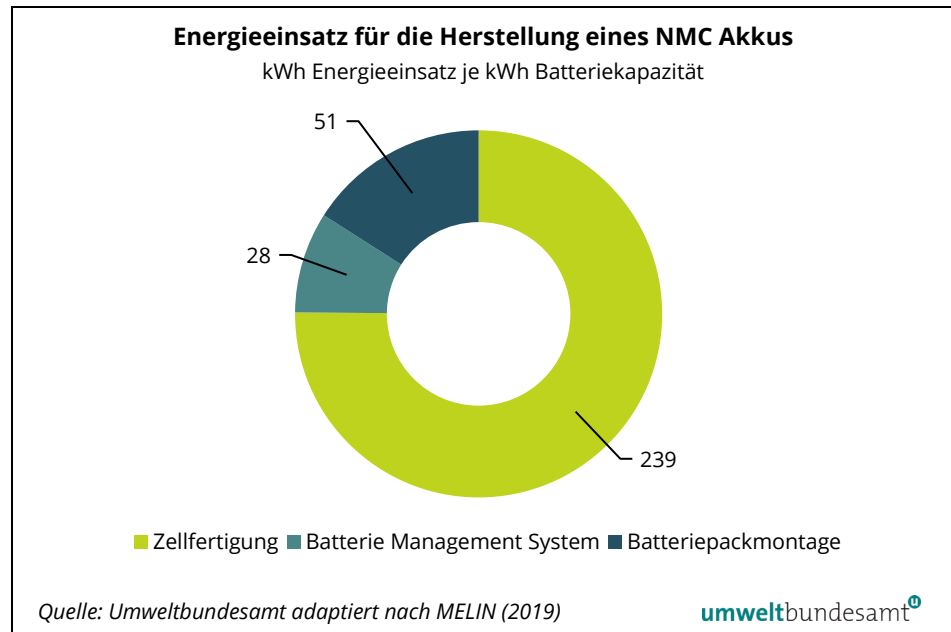
**THG-Emissionen
zwischen 61 und
106 kg CO_{2eq}/kWh**

Bei der Bewertung der THG-Emissionen der Herstellung von Li-Ionen-Akkus kann mittlerweile auf eine umfassende Literatur zurückgegriffen werden. Aktuelle internationale Berechnungen gehen von THG-Emissionen in der Höhe von 61–106 kg CO_{2eq} je kWh Kapazität aus (DAHLLÖF & EMILSSON 2019, HELMS et al. 2019, MELIN 2019).

Die Herstellungskette eines Akkus ist komplex. Die Produktion einer Zelle benötigt rund 20 verschiedene Materialien, die verschiedene Aufbereitungsprozesse durchlaufen müssen. Anschließend werden die Zellen zu Batteriepacks und, gemeinsam mit dem Batterie Management System, zu einem Akku zusammgebaut.

Der kumulierte Energieaufwand (KEA) für die Herstellung eines Akkus beschreibt den gesamten Energieeinsatz bei Berücksichtigung aller Schritte in der Herstellungskette. Im KEA werden demnach, angefangen beim Erzabbau für z. B. Bauxit bis zur abschließenden Montage des Akkupacks, alle Energieeinsätze berücksichtigt und aufsummiert. Dabei werden je kWh Akkukapazität rund 330 kWh an Primärenergie eingesetzt, wovon rund zwei Drittel Strom und ein Drittel Prozesswärme ausmachen (MELIN 2019).

Abbildung 4:
Darstellung des
Energieeinsatzes für die
Herstellung eines
Li-Ionen-Akkupacks.



**Ø Emissionsfaktor:
82,5 kg CO_{2eq} je kWh
Li-Ionen-Akku**

Der Materialeinsatz der Bestandteile eines Akkus resultiert in rund 6 kg CO_{2eq} je kg Akku (GEMIS 2021, DUNN et al. 2015). Bei Berücksichtigung der noch fehlenden Energieeinsätze der Akkufertigung (d. h. die Zellfertigung, die Montage der Kathode und Anode aus den fertigen Bestandteilen) kommen weitere rund 6 kg CO_{2eq} je kg Akku hinzu (MELIN 2019). Insgesamt ergibt sich damit bei einer Energiedichte von 0,15 kWh je kg Akku ein Emissionsfaktor in der Höhe von **82,5 kg CO_{2eq} je kWh** Akkukapazität. Diesem Faktor zugrunde liegen die Annahmen, dass die fertigende Fabrik eine mittlere Effizienz bzw. Auslastung aufweist und mit einer fiktiven durchschnittlichen Stromzusammensetzung der Länder Japan, China und Südkorea betrieben wird.

Die potenzielle Bandbreite ergibt sich hier als Folge

1. des Einsatzes von Primär- oder Sekundärmaterialien,
2. der Effizienz (Auslastung) der Fabrik und
3. der Zusammensetzung des dort eingesetzten Stromes.

**THG-Reduktion
durch Einsatz von
Sekundärmaterialien**

Die massenmäßigen Hauptbestandteile eines Li-Ionen-Akkus sind Aluminium, Graphit, Kupfer, Stahl und Kunststoffe. Insbesondere bei diesen Materialien kann der Einsatz von **Sekundärmaterialien** erhebliche THG-Einsparungen mit sich bringen. Derzeit werden noch fast ausschließlich Primärrohstoffe eingesetzt, weshalb der Einsatz von Sekundärmaterialien in der Analyse der Akkuproduktion nicht berücksichtigt wurde.

Einige Prozessschritte in der Fertigung der Zellen erfordern unabhängig von den Produktionszahlen eine relativ konstante Energiemenge. Beispielhaft genannt werden kann der erforderliche Energieeinsatz für den Trockenraum im Anschluss an nasschemische Verfahren. Bei **Vollauslastung** der Fabrik (und damit des Trockenraumes) und durch Skaleneffekte kann der Energieeinsatz je produzierter kWh Akkukapazität bis 2030 dementsprechend signifikant reduziert werden.

Emissionsreduktion durch Energiemix

Der größte Hebel für die Vermeidung von THG-Emissionen in der Akkuherstellung liegt aber einmal mehr im eingesetzten **Energiemix** entlang der Herstellungskette, insbesondere in der Zusammensetzung des eingesetzten Stromes. Hier hätte beispielsweise der Einsatz von Strom aus erneuerbaren Energiequellen eine starke Reduktion der THG-Emissionen für die Herstellung des Akkus zur Folge.

Die chemische Zusammensetzung der Traktionsbatterie spielt nur eine untergeordnete Rolle, da die variablen Rohstoffe nur in geringen Mengen eingesetzt werden und im Abbau mit vergleichbaren THG-Emissionen behaftet sind. So ergibt sich eine Bandbreite von 48,8 kg CO_{2eq} je kWh Kapazität für Akkus, die in einer effizienten Fabrik und unter Einsatz erneuerbarer Energien produziert werden, und 94,9 kg CO_{2eq} je kWh Kapazität für Akkus aus teilausgelasteten Fabriken, die mehrheitlich mit fossiler Energie betrieben werden.

Tabelle 6:
Emissionen aus der Herstellung des Akkus.

	Emissionen aus der Herstellung des Akkus [kg CO _{2eq} /kWh Kapazität]		
	Best Case	verwendet	Worst Case
Pkw mit E-Motor	48,8	82,5	94,9

Quelle: Umweltbundesamt

2.2.5 Brennstoffzelle

wesentlicher Bestandteil einer Brennstoffzelle ist PGM

Für die THG-Emissionen aus der Herstellung der Brennstoffzelle sind insbesondere die Metalle der Gruppe der Platinmetalle (PGM) von Bedeutung. Werden primäre PGM eingesetzt (derzeit gängige Praxis) sind rund 40–50 % der herstellungsbedingten THG-Emissionen der Brennstoffzelle eben diesen zuzuordnen.

In Brennstoffzellen werden rund 0,4 g an PGM je kW Leistung eingesetzt. Der Anteil an PGM wird sich in den kommenden Jahren drastisch reduzieren, wobei auch der Anteil der Sekundärmaterialien wachsen wird. Dadurch und durch vermehrten Einsatz von erneuerbaren Energieträgern können die THG-Emissionen entlang der Herstellungskette reduziert werden. Neuere Entwicklungen bei Brennstoffzellen zielen darauf ab, PGM z. B. durch Kupfer zu ersetzen, was ebenfalls eine deutliche Treibhausgasreduktion zur Folge haben kann.

Ø Emissionsfaktor: 30 kg CO_{2eq} je kW Leistung der Zelle

Der Emissionsfaktor für die Herstellung von Brennstoffzellen liegt in der Größenordnung von 15 kg CO_{2eq} je kW Leistung der Zelle (bei technologischer Weiterentwicklung der Brennstoffzellen und geringeren eingesetzten Mengen an PGM, die zudem aus Sekundärmaterialien stammen) und 40 kg CO_{2eq} je kW Leistung der Zelle (bei den gegenwärtig eingesetzten Mengen an Primär-PGM). In dieser Studie wurde ein leichter technologischer Fortschritt in den kommenden Jahren zugrunde gelegt und mit rund 30 kg CO_{2eq} je kW Leistung der Zelle gerechnet (STERNBERG et al. 2019). Der Einsatz von Sekundär-PGM, ebenso wie von alternativen Substitutionsmaterialien, wurde in der Studie aufgrund der unsicheren Datenlage nicht näher analysiert.

Tabelle 7:
Emissionen aus
der Herstellung der
Brennstoffzelle.

	Emissionen aus der Herstellung des Akkus [kg CO _{2eq} /kW Leistung der Zelle]		
	Best Case	verwendet	Worst Case
FCEV	15	30	40

Quelle: Umweltbundesamt

2.2.6 Wasserstoffspeicher

Für die Speicherung von Wasserstoff in mobilen Anwendungsbereichen, wie beispielsweise dem Pkw, eignen sich aus Gewichts- und Volumsgründen, ebenso wie aufgrund sicherheitstechnischer Aspekte lediglich sogenannte Typ 4 Speicher. Diese können Wasserstoff mit 700 bar speichern und bestehen aus mit gewickelten Karbonfasern verstärktem Kunststoff (z. B. Epoxidharz) (REUTER et al. 2019).

Karbonfaser für den H₂-Speicher

Die THG-Emissionen stammen zum überwiegenden Teil (mehr als 90 %) aus dem Einsatz der Karbonfasern. Die Emissionsfaktoren je kg Karbonfaser unterscheiden sich in der Literatur deutlich und reichen von 20 kg CO_{2eq} je kg bis zu 40 kg CO_{2eq} je kg (STERNBERG et al. 2019).

Ø Emissionsfaktor: 510 kg CO_{2eq} je kg Wasserstoff- Speichervermögen

Für die Berechnungen in der Studie wurde der Mittelwert (30 kg CO_{2eq} je kg Speichervermögen) herangezogen und auf das Speichervermögen bezogen. Damit wird ein Emissionsfaktor von 510 kg CO_{2eq} je kg Wasserstoff-Speichervermögen berechnet. Derzeit kommen im Bereich der Pkw Wasserstofftanks mit einem Fassungsvermögen von rund 6 kg Wasserstoff zum Einsatz.

Tabelle 8:
Emissionen aus der
Herstellung des Wasser-
stoffspeichers.

	Emissionen aus der Herstellung des H ₂ -Speichers [kg CO _{2eq} /kg Speichervermögen]		
	Best Case	verwendet	Worst Case
FCEV	340	510	680

Quelle: Umweltbundesamt

2.2.7 Übersicht Fahrzeugherstellung

Tabelle 9 gibt einen Überblick über die THG-Emissionsfaktoren der diskutierten Parameter der Fahrzeugherstellung, die für den Technologievergleich herangezogen werden.

Tabelle 9:
Übersicht über die THG-Emissionsfaktoren der wesentlichen Parameter der Fahrzeugherstellung.

Parameter der Fahrzeugherstellung	THG-Emissionsfaktor	Systemgrenze und Kurzbeschreibung
Grundfahrzeug: ICE, HEV, PHEV5	7,2 kg CO _{2eq} je kg Pkw	Karosserie, Verbrennungsmotor, Antriebsstrang, Montage in Europa
Grundfahrzeug: BEV bzw. FCEV	6,2 kg CO _{2eq} je kg Pkw	Karosserie, Montage in Europa
Elektromotor	4,5 kg CO _{2eq} je kW Leistung	Materialeinsatz und Energieeinsatz der Montage, europäischer Strommix für Montage
Antriebsstrang	42 kg CO _{2eq} je kg	Kabel, Ladegerät, Inverter, Konverter und Stromverteiler. Produktion in Europa
Li-Ionen-Akku	82,5 kg CO _{2eq} je kWh Kapazität	Materialeinsatz und Energieeinsatz der Montage, fiktiver durchschnittlicher Strommix aus China, Japan und Südkorea
Brennstoffzelle	30 kg CO _{2eq} je kW Leistung	Material- und Energieeinsatz, großer Einfluss der PGM
Wasserstoffspeicher	510 kg CO _{2eq} je kg Speicher-volumen	Materialeinsatz mit durchschnittlichen Emissionsfaktor für die Karbonfaser

Quelle: Umweltbundesamt

2.3 Relevante Parameter für die Energiebereitstellung

Für die Analyse der THG-Emissionen aus der Energiebereitstellung werden nachfolgend drei Parameter im Detail erläutert und in Kapitel 2.3.4 um weitere Emissionsfaktoren ergänzt

2.3.1 Ad-Blue

die Herstellung von Ad-Blue verursacht THG-Emissionen

Für alle Diesel-Pkw wird ein Einsatz von Ad-Blue von 2 % des fossilen Verbrauchs unterstellt. Demnach müssen die THG-Emissionen, die bei der Herstellung von Ad-Blue anfallen, berücksichtigt werden. Die herstellungsbedingten Emissionen betragen rund 0,6 kg CO_{2eq} je Liter Ad-Blue. Die Emissionen stammen hauptsächlich aus der Ammoniakproduktion.

⁵ HEV und PHEV ohne Akku, E-Motor, etc.

2.3.2 Wasserstoff

**zwei Arten der
Wasserstoff-
herstellung**

Die Bereitstellung des Wasserstoffs für FCEV wird in dieser Studie auf zwei Herstellungspfaden dargestellt:

- Wasserstoff mittels Erdgasreforming und
- Wasserstoff mittels Elektrolyse aus erneuerbarem Strom.

**Ø Emissionsfaktor
grauer Wasserstoff:
0,32 kg CO_{2eq} je kWh
Energiegehalt**

Erdgasreforming ist die weltweit am meisten verbreitete Form der Wasserstoffproduktion. Der so hergestellte Wasserstoff wird als grauer Wasserstoff bezeichnet und trägt aufgrund seines fossilen Ursprunges nicht zur Reduktion der THG-Emissionen aus dem Verkehrssektor bei. Der Emissionsfaktor für grauen Wasserstoff (inkl. dessen Verdichtung zur Betankung und Speicherung im Wasserstofftank) beläuft sich auf **0,32 kg CO_{2eq} je kWh Energiegehalt**.

Bei der **Elektrolyse** wird Wasser mittels eines Elektrolyseurs in Wasserstoff und Sauerstoff aufgespalten. THG-Emissionen entstehen bei diesem Prozess vorrangig in Abhängigkeit von der Zusammensetzung des für den Elektrolyseur eingesetzten Stromes. Dadurch kann die Elektrolyse aber auch mit Strom ausschließlich aus erneuerbaren Energiequellen betrieben werden. Der so generierte Wasserstoff wird als grüner Wasserstoff bezeichnet und ermöglicht einen potenziell CO₂-freien Einsatz von FCEV.

**Ø Emissionsfaktor
grüner Wasserstoff:
0,02 kg CO_{2eq} je kWh
Energiegehalt**

Der Wirkungsgrad von derzeit eingesetzten Elektrolyseuren liegt brennwertbezogen bei rund 70 %. Je kg Wasserstoff ist damit ein Stromeinsatz von rund 50 kWh notwendig, wobei hier die Verdichtung mit knapp 3 kWh bereits inkludiert ist. Bei Verwendung von 100 % erneuerbarem Strom und bei Berücksichtigung der Verdichtung, die ebenfalls mit erneuerbarem Strom vollzogen wird, ergibt sich ein Emissionsfaktor von **0,02 kg CO_{2eq} je kWh Energiegehalt** – weniger als ein Zehntel im Vergleich mit dem Prozess des Erdgasreformings.

Wird Strom der österreichischen Stromaufbringung⁶ für die Elektrolyse verwendet, ergibt sich ein Emissionsfaktor von 0,43 kg CO_{2eq} je kWh Energiegehalt. Dies ist insbesondere auf die großen Mengen an erforderlichem, mit entsprechenden THG-Emissionen behaftetem Strom, zurückzuführen. Der so gewonnene Wasserstoff ist somit mit deutlich höheren THG-Emissionen behaftet als Wasserstoff aus fossilem Erdgas bzw. Wasserstoff aus 100 % erneuerbaren Energien, weshalb diese Option in weiterer Folge nicht berücksichtigt wurde.

⁶ Bei der Stromaufbringung Österreich werden die inländische Stromerzeugung und die Stromimporte berücksichtigt. Der Emissionsfaktor für die inländische Stromerzeugung wird anhand des Kraftwerkparks ermittelt. Für die Stromimporte werden die Emissionsfaktoren der Stromerzeugung der Importländer herangezogen.

2.3.3 Strombasierte flüssige Kraftstoffe

Strombasierte flüssige Kraftstoffe (auch e-Fuels genannt) bieten die Möglichkeit, konventionell angetriebene Fahrzeuge potenziell CO₂-neutral einzusetzen, falls die Energie der Produktionskette aus erneuerbaren Energiequellen bereitgestellt wird. Die Herstellungskette beginnt für jeden derartigen e-Fuel mit Wasserstoff aus Elektrolyse unter Einsatz von Strom aus erneuerbaren Energiequellen. Im nächsten Schritt müssen aus dem Wasserstoff langkettige Kohlenwasserstoffe synthetisiert werden. Dafür kommen prinzipiell mehrere Verfahren in Betracht. In der gegenständlichen Studie wird ausschließlich das am stärksten verbreitete Verfahren der Fischer-Tropsch-Synthese betrachtet. Diese Prozesskette verursacht durch die oftmalige Umwandlung und den dadurch vergleichsweise niedrigen Systemwirkungsgrad⁷ hohe Energieverluste.

CO₂-neutrale Kraftstoffe mit hohen Energieverlusten

Tabelle 10:
Übersicht über den Systemwirkungsgrad unterschiedlicher Antriebstechnologien und Kraftstoffe im Bereich Pkw.

Prozessschritte	BEV	FCEV	ICE	ICE (FTS)
EE-Strom	100 %	100 %		100 %
Transporte/Leistungsverluste/ Aufbereitungsverluste	95 %	90 %	85 %	95 %
Elektrolyse		70 %		70 %
Fischer-Tropsch-Synthese				70 %
Wasserstoffverflüssigung		80 %		
Brennstoffzelle		60 %		
Batterie	95 %	95 %		
Elektromotor	90 %	90 %		
Verbrennungskraftmaschine			30 %	30 %
Systemwirkungsgrad	81 %	26 %	26 %	14 %

Quelle: Umweltbundesamt in Anlehnung an WAGEMANN & AUSFELDER 2017

e-Fuels benötigen Wasserstoff und CO₂

Für ein Kilogramm „Fischer-Tropsch-Treibstoff“ sind neben 0,5 kg Wasserstoff (Erzeugung bereits beschrieben in Kapitel 2.3.2) auch ungefähr 3 kg CO₂ als Eingangsstoffe für die Fischer-Tropsch-Synthese notwendig. Dieses CO₂ kann prinzipiell aus unterschiedlichen Quellen stammen. Die wichtigsten werden nachfolgend erläutert.

1. **Biogene Quellen:** Eine Möglichkeit besteht im Einsatz von CO₂ aus der Verwertung von Biomasse, also Holz oder Pflanzen. Das Angebot der erforderlichen Biomasse ist aber insofern beschränkt, als Holz als Energieträger für die Raumwärme und als Rohstoff anstelle von abiotischen (nicht erneuerbaren) Materialien, wie z. B. Beton oder Stahl im Bau und bei der Herstellung von Waren, eingesetzt werden sollte.

⁷ Der Systemwirkungsgrad gibt an, welcher Anteil der eingesetzten Primärenergie in Bewegungsenergie umgewandelt wird.

2. **„Doppelnutzung“ fossiler Energie:** Bei der Verbrennung fossiler Rohstoffe, beispielsweise in Kohlekraftwerken oder bei industriellen Prozessen, entsteht CO₂. Wird dieses CO₂ noch im Kraftwerk bzw. in der Industrieanlage für die Herstellung von e-Fuels abgeschieden, hat dies am Beispiel des Kraftwerkes eine Verschlechterung des Wirkungsgrades der Stromproduktion zur Folge. Auch bei Industrieanlagen muss zusätzliche Energie für die Abscheidung eingesetzt werden. Die vorgelagerten Emissionen der fossilen Energiequelle fallen in jedem Fall an. Schließlich wird die Atmosphäre auf diese Art dennoch, nur über den „Umweg“ e-Fuel, mit CO₂ aus fossilen Quellen belastet.
3. **Atmosphäre als Quelle** (Direct Air Capture-Methode – Adsorption und Desorption): Bei dieser Methode dient die Umgebungsluft als Quelle für das benötigte CO₂. Dabei wird der Atmosphäre CO₂ entzogen, das zuvor durch die Verbrennung fossiler Energie in die Atmosphäre gelangt ist. Der Entzug und die anschließende Nutzung von CO₂ aus der Atmosphäre erfordern einen hohen Energieeinsatz. Allerdings handelt es sich hierbei um jene Quelle bzw. Methode, mit der e-Fuels potenziell klimaneutral und in ausreichenden Mengen hergestellt werden. Aus diesem Grund basieren die nachfolgenden Analysen auf e-Fuels, die unter Einsatz von CO₂ aus der Atmosphäre hergestellt wurden.

Bei der Direct Air Capture-Methode werden selbst bei Nutzung der Abwärme der FTS rund 0,5 kWh elektrische Energie und zusätzlich rund 0,9 kWh thermische Energie je kg CO₂ benötigt. Ein Klimavorteil ist nur dann gegeben, wenn erneuerbarer Strom und Biomasse als Energieträger eingesetzt werden. Je kg CO₂ entstehen damit Emissionen in der Höhe von rund 0,03 kg CO_{2eq}. Wird Direct Air Capture mit Erdgas und Strom aus der durchschnittlichen österreichischen Stromaufbringung durchgeführt, erhöht sich dieser Wert auf rund 0,38 kg CO_{2eq} je kg CO₂.

**Ø Emissionsfaktor
für e-Fuels mit
hoher Bandbreite**

Bei integrierter Betrachtung ergeben sich durch die Wasserstoffproduktion, die CO₂-Absorption und die Fischer-Tropsch-Synthese Emissionen im Ausmaß von rund **0,04 kg CO_{2eq} je kWh e-Fuel**, wenn über den gesamten Herstellungsprozess ausschließlich erneuerbare Energie eingesetzt wird (Best Case). Werden hingegen österreichischer Durchschnittsstrom und Erdgas eingesetzt, erhöht sich der Wert auf 0,7 kg CO_{2eq} je kWh e-Fuel. Der Einsatz von fossiler Energie als Prozesswärme und Strom zur Herstellung von synthetischen Kraftstoffen entlang mehrerer verlustbehafteter Umwandlungsschritte ist jedoch nicht sinnvoll, da sich dadurch höhere CO₂-Emissionen ergeben als beim direkten Einsatz des fossilen Energieträgers im Kraftfahrzeug.

2.3.4 Übersicht Energiebereitstellung

Tabelle 11 gibt einen Überblick über die THG-Emissionsfaktoren der Energiebereitstellung, die für den Technologievergleich herangezogen werden.

*Tabelle 11:
Übersicht über die
THG-Emissionsfaktoren
der wesentlichen
Parameter der Energie-
bereitstellung.*

Parameter des Fahrbetriebes	THG-Emissionsfaktor	Systemgrenze und Kurzbeschreibung
Benzin, CNG, Diesel (fossil)	0,07 kg CO _{2eq} je kWh Energiegehalt	Bereitstellung von 1 kWh fossilen Treibstoffs, inkludiert die Vorkette von der Förderung bis zur Tankstelle
Biomethan	0,11 kg CO _{2eq} je kWh Energiegehalt	Bereitstellung von 1 kWh Biome- than in CNG-Qualität. Ausgangs- stoffe sind Gülle und Mais im Ver- hältnis 50/50
Erneuerbarer Strom	0,014 kg CO _{2eq} je kWh Energiegehalt	Strom ausschließlich aus erneuer- baren Energieträgern, Wasserkraft (60 %), Wind (30 %), PV (10 %)
Stromaufbringung	0,27 kg CO _{2eq} je kWh Energiegehalt	durchschnittliche österreichische Stromaufbringung, inkl. Stromim- port
H ₂ -Reforming	0,32 kg CO _{2eq} je kWh Energiegehalt	Erdgasförderung und Reforming- prozess sowie Verdichtung
H ₂ -Elektrolyse mit erneuerbarem Strom	0,02 kg CO _{2eq} je kWh Energiegehalt	100 % erneuerbarer Stromeinsatz zur Elektrolyse und Verdichtung
E-Fuels	0,04kg CO _{2eq} je kWh Energiegehalt	Einsatz von ausschließlich EE- Strom entlang der gesamten Her- stellungskette, d. h. Elektrolyse, FT-Synthese und CO ₂ -Absorption. Zusätzlich wird der Wärmebedarf aus Biomasse bereitgestellt

Quelle: Umweltbundesamt

3 ERGEBNISSE

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse der Lebenszyklusanalyse im Hinblick auf THG-Emissionen und kumulierten Energieaufwand exemplarisch für die **Kompaktklasse II** visualisiert und diskutiert. Die gesammelten Ergebnisse für alle Fahrzeugsegmente sind diesem Bericht im Anhang angefügt.

Die Option strombasierte flüssige Kraftstoffe für Verbrennungskraftmaschinen wird gesondert in Kapitel 3.3 besprochen.

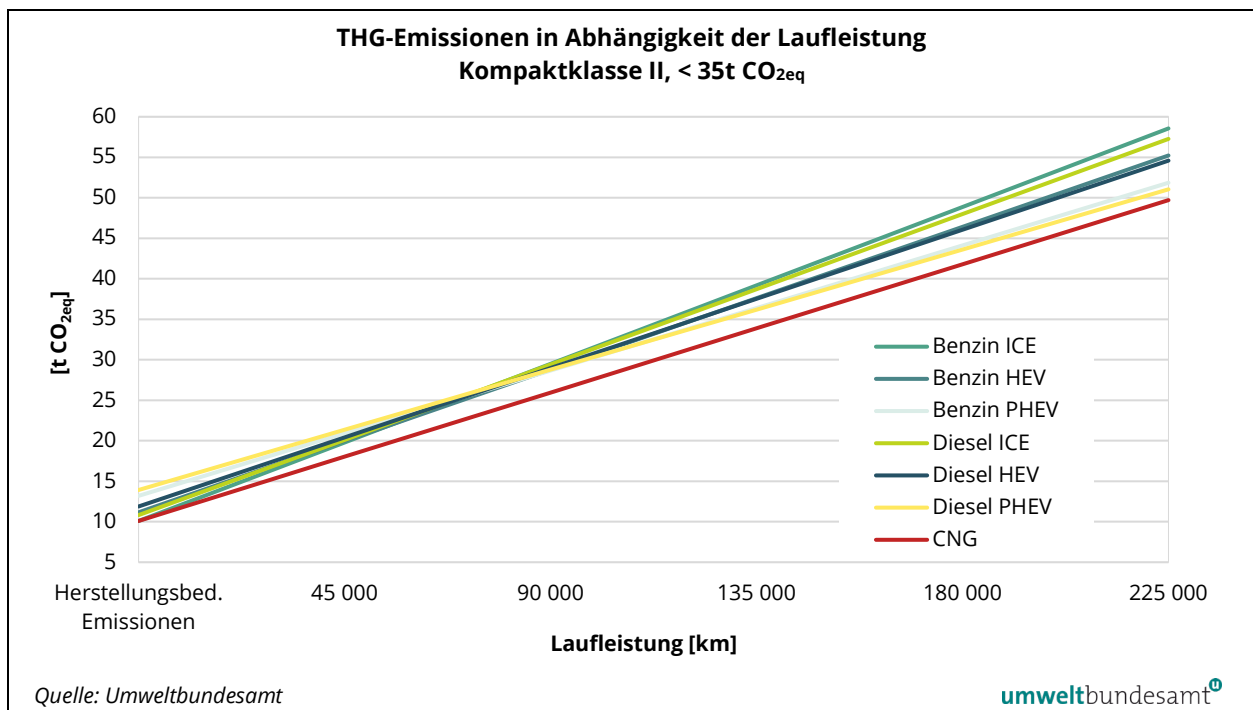
3.1 Treibhausgase

3.1.1 Lebenszyklusemissionen

höchste THG-Emissionen bei fossilen Energieträgern

Jene Technologien, die hauptsächlich auf eine fossile Energieversorgung angewiesen sind (Benzin und Diesel ICE, HEV, PHEV sowie CNG-ICE, siehe Abbildung 4) weisen am Beispiel der Kompaktklasse mit knapp unter 50 t CO_{2eq} bis 58 t CO_{2eq} über den gesamten Lebenszyklus mit Abstand die höchsten THG-Emissionen auf. Durch Hybridisierung können diese Lebenszyklusemissionen nur relativ gering um rund 6 % (HEV) bzw. 11 % (PHEV) reduziert werden.

Abbildung 5: Vergleich der THG-Emissionen über den gesamten Lebenszyklus am Beispiel der Kompaktklasse II, Optionen mit mehr als 35 t CO_{2eq}.



geringere Emissionen bei Einsatz von Elektromotoren

Deutlich niedrigere Werte weisen jene Fahrzeuge auf, in denen ausschließlich Elektromotoren zum Einsatz kommen. So belaufen sich die Lebenszyklusemissionen sowohl von BEV als auch von FCEV auf rund 18 t CO_{2eq}, wenn in beiden Varianten ausschließlich Strom aus erneuerbaren Energiequellen zum Laden bzw. zur Produktion des Wasserstoffes eingesetzt wird (siehe Abbildung 5).

Wird für BEV durchschnittlicher österreichischer Strom eingesetzt, erhöhen sich die Lebenszyklusemissionen auf 29 t CO_{2eq}, bei FCEV mit Wasserstoff aus Erdgasreforming auf 33 t CO_{2eq}. Die Differenz in den herstellungsbedingten Emissionen zugunsten des FCEV ergibt sich insbesondere aus der Produktion des Akkumulators für den BEV.

Einsatz von Biomethan

Mit 27 t CO_{2eq} ebenfalls in dieser Größenordnung befindet sich das konventionell angetriebene Fahrzeug, das mit Biomethan betrieben wird. Dem Biomethan wird dabei eine Mischung aus Gülle und Maissilage zu jeweils 50 % zugrunde gelegt. An dieser Stelle ist jedoch das vergleichsweise geringe Produktionspotenzial festzuhalten, das sich auch im aktuellen Beitrag von Biomethan von lediglich 0,05 % an den 2019 abgesetzten Biokraftstoffen in Österreich widerspiegelt (MITTERHUEMER & WINTER 2020).

Abbildung 6: Vergleich der THG-Emissionen über den gesamten Lebenszyklus am Beispiel der Kompaktklasse II, Optionen mit weniger als 35 t CO_{2eq}.

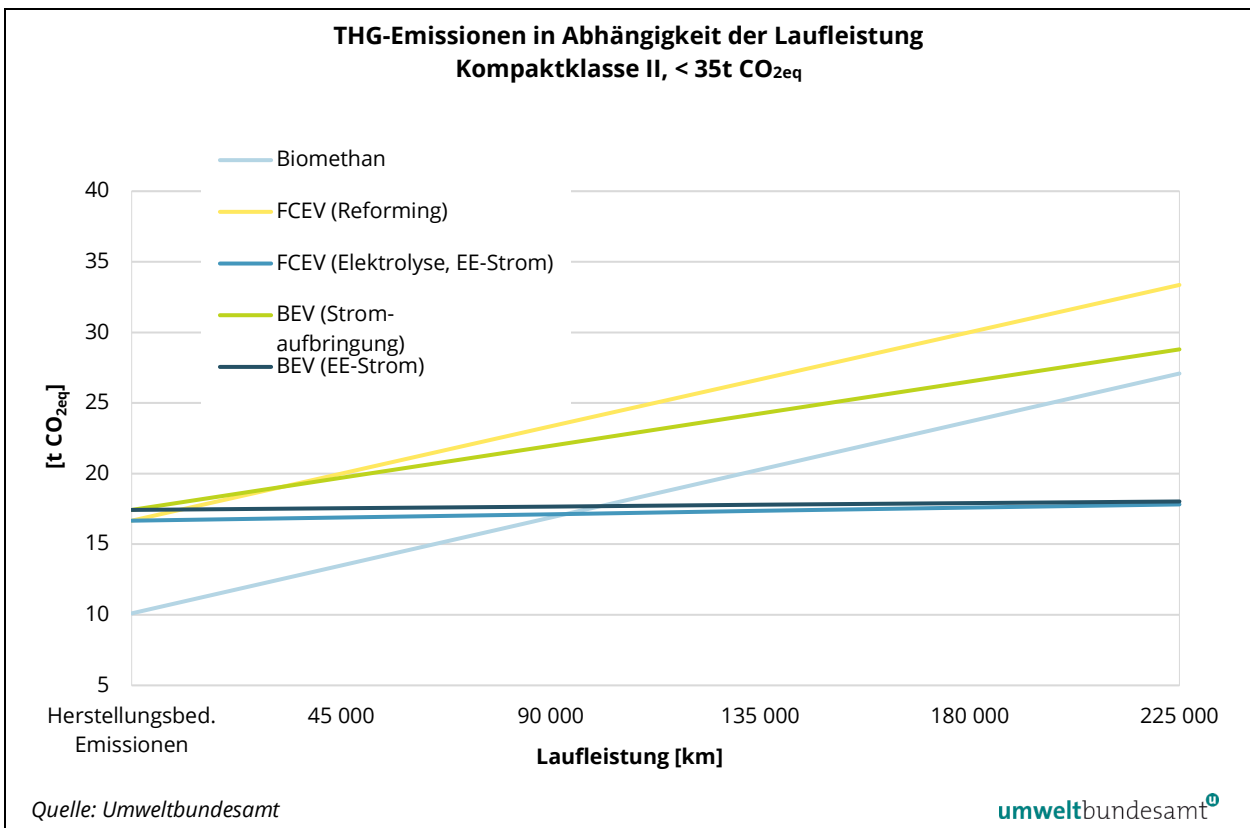


Tabelle 12 kann die ungefähre Laufleistung entnommen werden, ab der die höheren herstellungsbedingten THG-Emissionen des BEV im Vergleich zu konventionell angetriebenen ICE amortisiert werden. Dabei werden ergänzend zu den

Ergebnissen der besprochenen Kompaktklasse II auch jene Schnittpunkte der übrigen Fahrzeugsegmente ausgewiesen.

Wie der Tabelle entnommen werden kann, steigt die Laufleistung, ab der das BEV seinen Klimavorteil ausspielen kann, mit der Größe und dem Gewicht des Fahrzeuges und der verbauten Akkukapazität. Kommt ausschließlich Strom aus erneuerbaren Energiequellen zum Einsatz, bewegen sich diese Laufleistungen zwischen 10.000 km (Kleinwagen) und 35.000 km (Oberklasse). Kommt Strom in der durchschnittlichen österreichischen Zusammensetzung zum Einsatz, erhöhen sich die erforderlichen Laufleistungen um 20–28 %. Die große Differenz zwischen den Kompaktklassen I und II ergibt sich dadurch, dass sich die verbauten Akkukapazitäten beim BEV um 25 kWh unterscheiden, diese Fahrzeuge aber mit demselben ICE verglichen wurden.

*Tabelle 12:
Zur Amortisation der
herstellungsbedingten
Mehremissionen erforderliche
Fahrleistung von BEV.*

	Klein- wagen	Kompakt- klasse I	Kompakt- klasse II	Ober- klasse
	<i>Fahrleistung in km</i>			
BEV (Stromaufbringung) → ICE	12.000	25.000	42.000	45.000
BEV (EE-Strom) → ICE	10.000	20.000	33.000	35.000

Quelle: Umweltbundesamt

3.1.2 Emissionen der Herstellung

zusätzliche THG- Emissionen bei Elektrifizierung

Bei der Herstellung eines modernen ICE Pkw der Kompaktklasse mit rund 1.400 kg (mit Ottomotor) und 1.500 kg (mit Dieselmotor) entstehen rund 10 bzw. 11 Tonnen an THG-Emissionen. Werden diese Fahrzeuge hybridisiert, erhöhen sich die Emissionen durch die Herstellung der ergänzenden Bauteile (Akku mit Kapazität von 6 kWh, Antriebsstrang mit 5 kg sowie ein kleiner Elektromotor mit 80 kW Leistung) um knapp eine Tonne. Beim PHEV (Akku mit Kapazität von 15 kWh, Antriebsstrang mit 25 kg sowie ein Elektromotor mit 100 kW Leistung) entstehen sogar zusätzlich rund 3 Tonnen an THG-Emissionen.

Bei der Herstellung der Karosserie für alternativ angetriebene Fahrzeuge (BEV und FCEV) entstehen zunächst „nur“ etwas mehr als 9 Tonnen an THG-Emissionen. Durch die weiteren Bauteile kommen jedoch noch erhebliche Emissionsmengen dazu. Durch den Elektromotor, der bei beiden Antriebsarten mit rund 140 kW angenommen wurde, entstehen 630 kg CO_{2eq}.

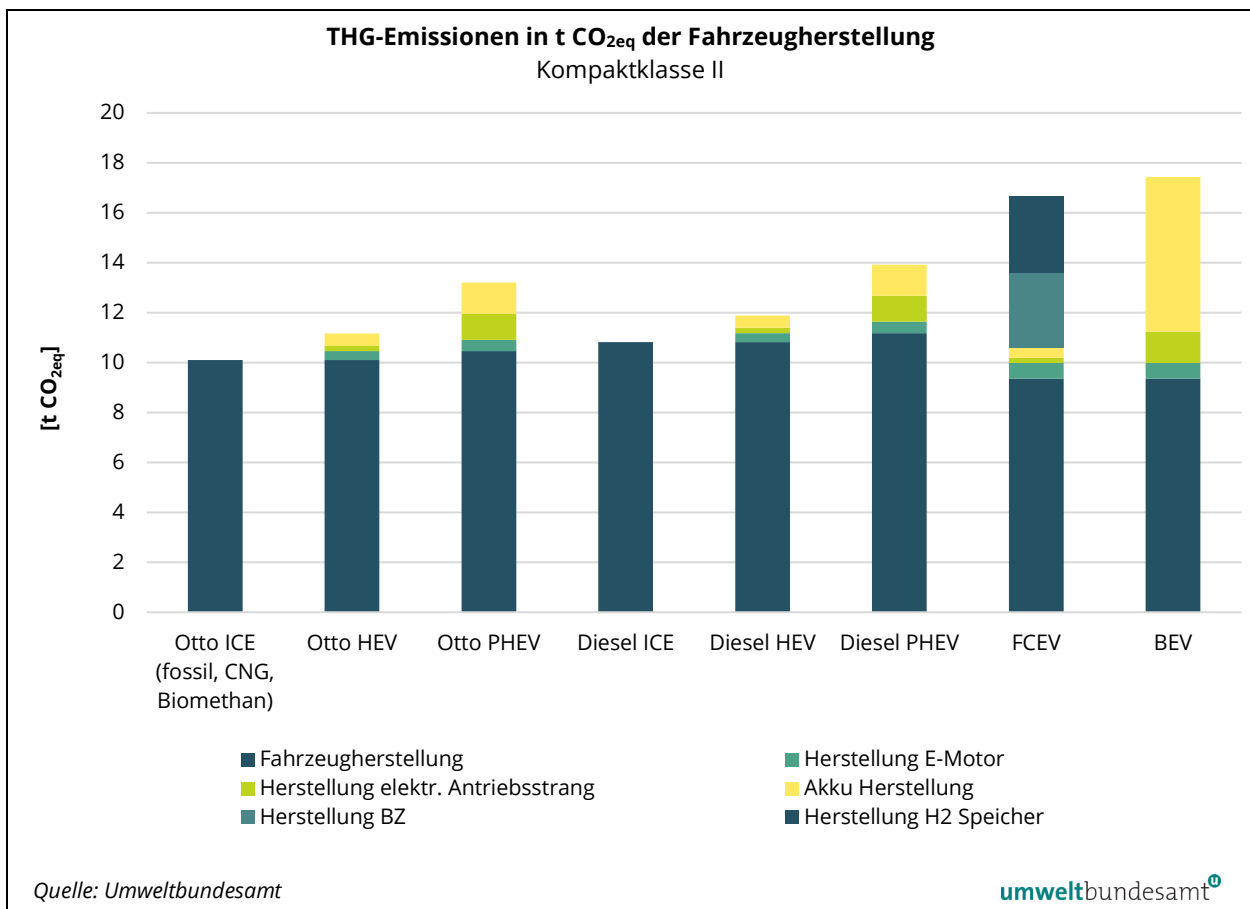
Die angenommene Brennstoffzelle des FCEV weist eine Leistung von 100 kW auf und die herstellungsbedingten Emissionen belaufen sich auf rund 3 Tonnen an Treibhausgasen. Auch die Herstellung des Wasserstofftanks verursacht erhebliche THG-Emissionen von ebenfalls knapp unter 3 Tonnen CO_{2eq}. Damit erhöhen sich die herstellungsbedingten Emissionen bei FCEV auf rund 16,5 t CO_{2eq}.

Bei BEV stellt der Antriebsstrang (Konverter, Inverter, Ladekabel etc.) mit rund 1,3 Tonnen CO_{2eq} eine weitere Emissionsquelle dar. Weitaus größere Emissio-

nen entstehen aber bei der Herstellung des Akkus. Im Bereich der hier diskutierten Kompaktklasse II wird von einer Kapazität des Akkus von 75 kWh ausgegangen. Die Herstellung dieses Akkus bedingt rund 6,2 Tonnen an Treibhausgasen, wodurch sich die herstellungsbedingten Emissionen bei BEV zu 17,4 t CO_{2eq} summieren.

Einsparpotenziale In allen Bereichen der Fahrzeugherstellung liegen erhebliche Einsparpotenziale. Die größten Möglichkeiten liegen im Einsatz von Sekundärmaterialien sowie im Einsatz von erneuerbaren Energieträgern, insbesondere beim Stromeinsatz.

Abbildung 7: Vergleich der herstellungsbedingten THG-Emissionen in t CO_{2eq} am Beispiel der Kompaktklasse II.



3.1.3 Emissionen bezogen auf Fahrzeugkilometer

Wie bereits erläutert, werden in der Studie eine durchschnittliche Jahresfahrleistung von 15.000 km und eine Lebensdauer von 15 Jahren zugrunde gelegt. Damit ergibt sich eine Lebensfahrleistung von 225.000 km, durch die die Lebenszyklusemissionen der einzelnen Emissionsquellen dividiert werden können. Die so generierten THG-Emissionen je gefahrenen Kilometer sind in Abbildung 7 dargestellt.

Mit rund 260 g CO_{2eq} je Fahrzeugkilometer (Fkm) fallen die höchsten THG-Emissionen bei der Nutzung von konventionell angetriebenen Fahrzeugen mit Ottomotor an. Bei konventionell angetriebenen Fahrzeugen mit Dieselmotor liegen die Emissionen mit 254 g CO_{2eq} je Fkm nur geringfügig niedriger.

**Emissionen bei HEV
und PHEV**

Bei HEV sind die Emissionen je Fahrzeugkilometer um 6 % (Otto) bzw. 5 % (Diesel), bei PHEV um rund 11 % niedriger als bei vergleichbaren konventionell angetriebenen Fahrzeugen. Bei PHEV wird dabei von einer elektrischen Fahrleistung von 30 % ausgegangen, d. h. 70 % der Fahrleistung wird mit fossilem Antrieb zurückgelegt. Wird dieses Verhältnis umgedreht, reduzieren sich die THG-Emissionen deutlich auf rund 60 % der fossilen Emissionen, was das große Einsparpotenzial bei PHEV bei entsprechendem Lade- und Nutzungsverhalten verdeutlicht. Ähnlich hohe Emissionen wie bei PHEV entstehen bei der Nutzung von ICE mit Erdgas (221 g CO_{2eq} je Fkm).

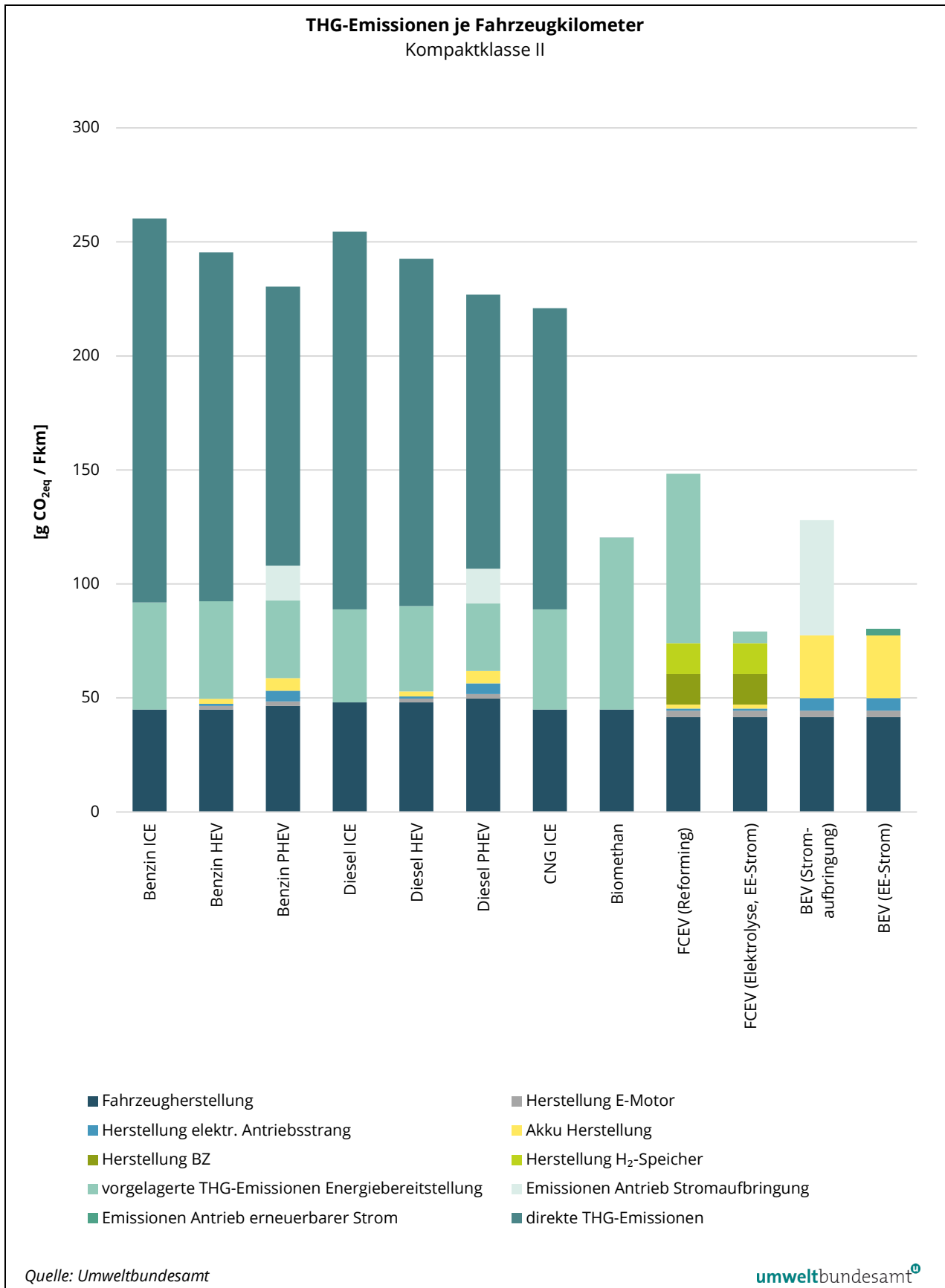
Emissionen bei FCEV

Für FCEV zeigt sich, dass es nur bei einer Energiebereitstellung, die rein auf erneuerbaren Energieträgern beruht und den Wasserstoff mittels Elektrolyse herstellt, zu starken Einsparungen kommt. Bei Wasserstoff aus Erdgasreforming verringern sich die THG-Emissionen gegenüber vergleichbaren ausschließlich fossil angetriebenen ICE um rund 40 %. Im „Best Case“, also im Falle der Nutzung von grünem Wasserstoff, ist eine Reduktion auf rund 80 g CO_{2eq} je Fkm möglich.

Emissionen bei BEV

Beim BEV ergeben sich gegenüber den rein fossilen ICE Einsparungen von rund 50 %, wenn der durchschnittliche österreichische Strom zum Einsatz kommt. Das volle Potenzial kann, ähnlich wie bei FCEV, nur dann ausgeschöpft werden, wenn ausschließlich Strom aus erneuerbaren Energiequellen zum Einsatz kommt. In diesem Fall lassen sich die Emissionen im Segment der Kompaktklasse II ebenfalls auf rund 80 g CO_{2eq} je Fkm reduzieren.

Abbildung 8: Vergleich der THG-Emissionen in g CO_{2eq} am Beispiel der Kompaktklasse II



3.2 Energieeinsatz

KEA und spezifischer Verbrauch

Unter dem Kumulierten Energieaufwand der Energiebereitstellung (KEA) wird die Summe aller Primärenergieinputs verstanden, die für ein Produkt (hier: die kWh Antriebsenergie) aufgewendet werden müssen.⁸ Dabei wird der gesamte Lebenszyklus eines Produktes – in dieser Studie der Energieträger zur Fortbewegung im Pkw – betrachtet und in jedem Schritt werden entlang der Herstellungskette sämtliche Primärenergieeinsätze berücksichtigt und kumuliert. Neben dem KEA ist beim Vergleich unterschiedlicher Pkw-Antriebssysteme auch der spezifische Verbrauch, d. h. der direkte Energieeinsatz für den Fahrbetrieb eine kritische Größe.

Einsparungspotenzial alternativer Antriebe

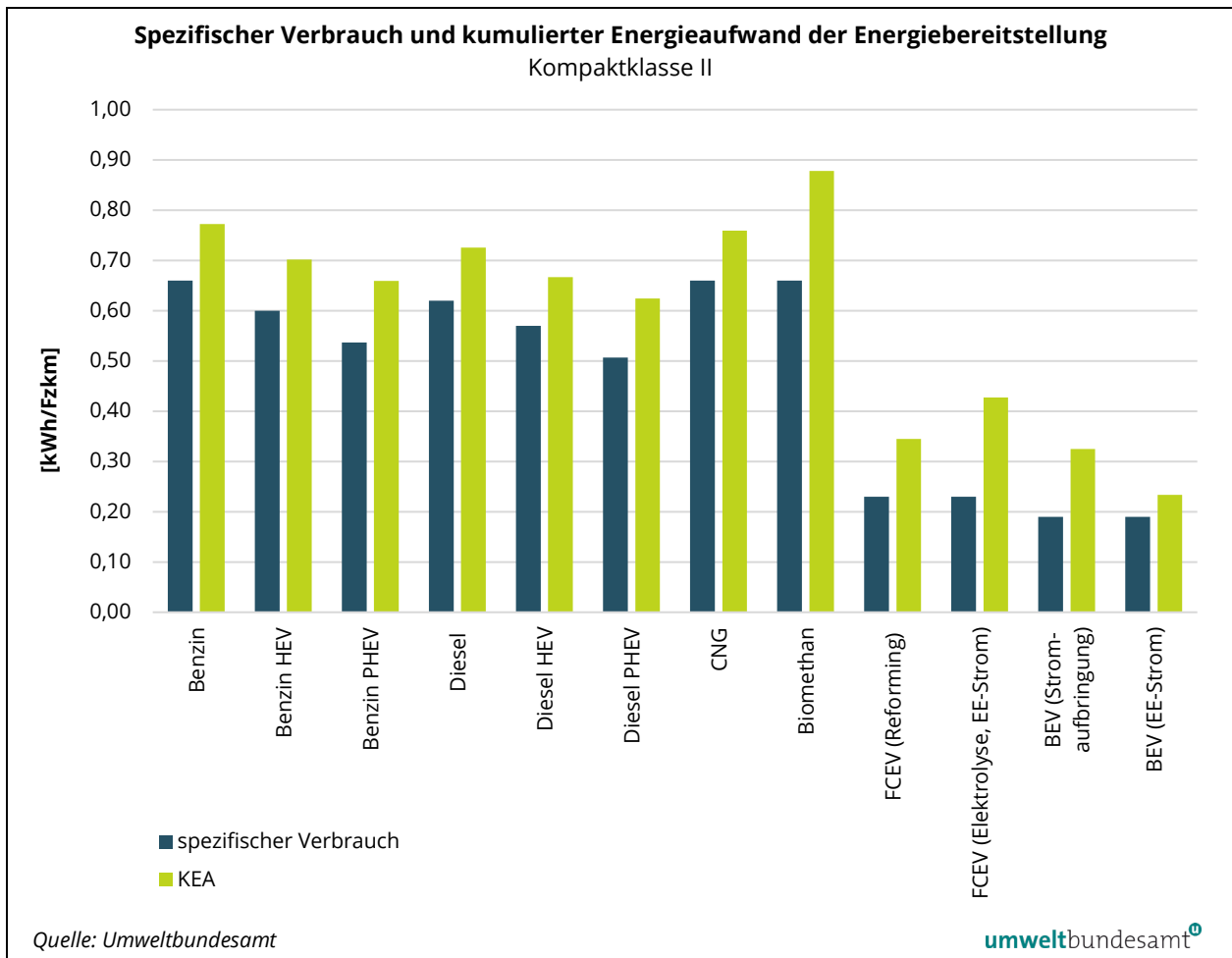
Abbildung 8 zeigt einen Technologievergleich im Hinblick auf den spezifischen Verbrauch und KEA. Wie der Abbildung entnommen werden kann, weisen alternativ angetriebene Fahrzeuge ohne Verbrennungskraftmaschine (BEV, FCEV) aufgrund des höheren Wirkungsgrades des Elektromotors nur rund ein Drittel des erforderlichen direkten Energieeinsatzes (spezifischer Verbrauch) auf wie vergleichbare konventionell angetriebene Fahrzeuge, bei BEV sogar nur bis zu 29 %. Und auch im Vergleich zu PHEV können noch Einsparungen in der Höhe von 55 % (FCEV zu Diesel PHEV) bis 63 % (BEV zu Diesel PHEV) erzielt werden.

KEA bei FCEV

Die Analyse des kumulierten Energieaufwandes der Energiebereitstellung verdeutlicht den Vorteil des höheren Wirkungsgrades des Elektromotors. Die Nutzung von FCEV erfordert einen kumulierten Energieaufwand in der Höhe von 0,35 kWh je Fkm mit grauem Wasserstoff bzw. 0,43 kWh je Fkm mit grünem Wasserstoff. Die Differenz ergibt sich dadurch, dass durch den Prozess des Erdgasreformings eine höhere Energieeffizienz gegeben ist als über den Weg der Elektrolyse. Im Vergleich zu konventionell angetriebenen Fahrzeugen bedeutet dies ungefähr eine Halbierung des kumulierten Energieaufwandes.

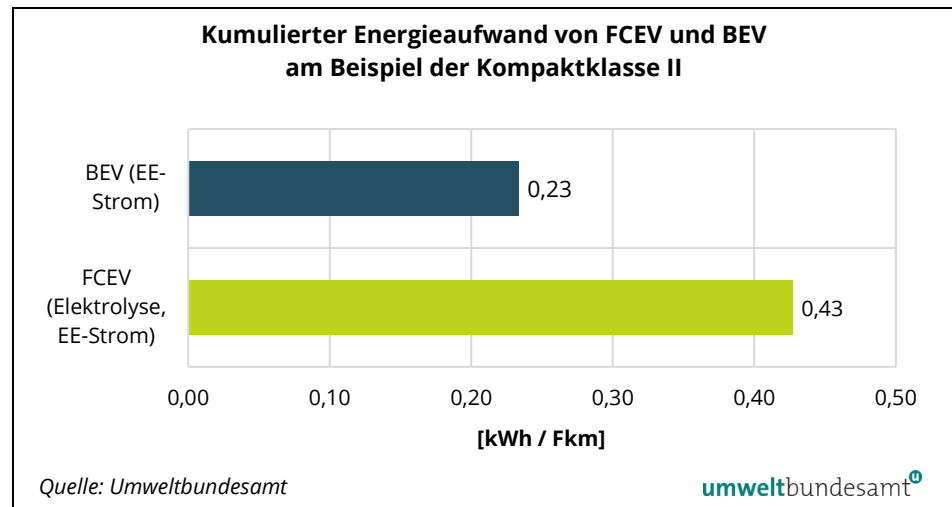
⁸ Definition angelehnt an Gabler Wirtschaftslexikon

Abbildung 9: Vergleich des spezifischen Verbrauchs sowie des kumulierten Energieaufwandes in kWh/Fkm am Beispiel der Kompaktklasse II.



KEA bei BEV Bei BEV lässt sich der kumulierte Energieaufwand der Energiebereitstellung im Falle des Einsatzes von Strom in der durchschnittlichen österreichischen Zusammensetzung auf 0,32 kWh je Fkm senken. Die höchste Energieeffizienz ergibt sich jedoch bei der Direktverstromung erneuerbarer Energie und durch den damit einhergehenden hohen Systemwirkungsgrad, wodurch sich der KEA auf 0,23 kWh je Fkm reduzieren lässt. Das bedeutet, dass für dieselbe Fahrleistung mit BEV ungefähr die halbe Energie eingesetzt werden muss als mit FCEV, was in nachfolgender Abbildung 9 nochmals verdeutlicht wird.

Abbildung 10:
Vergleich des kumulierten Energieaufwandes von FCEV (grüner H₂) und BEV in kWh/Fkm am Beispiel der Kompaktklasse II.



3.3 Exkurs e-Fuels

Wie in Kapitel 2.3.3 beschrieben, bieten synthetische flüssige Kraftstoffe aus erneuerbarem Strom die theoretische Möglichkeit, Fahrzeuge mit Verbrennungskraftmaschinen CO₂-neutral zu betreiben.

Praktisch befindet sich diese Kraftstoffoption noch in der Entwicklung und ein flächiger Einsatz derartiger e-Fuels ist nicht absehbar. So fehlt es gegenwärtig weltweit an den notwendigen Kapazitäten sowohl der Elektrolyseure als auch der Fischer-Tropsch-Synthesenanlagen. Auch zur Abscheidung von CO₂ aus der Atmosphäre wurden bislang nur Pilotanlagen errichtet.

**Herstellungskosten
sind nicht
konkurrenzfähig**

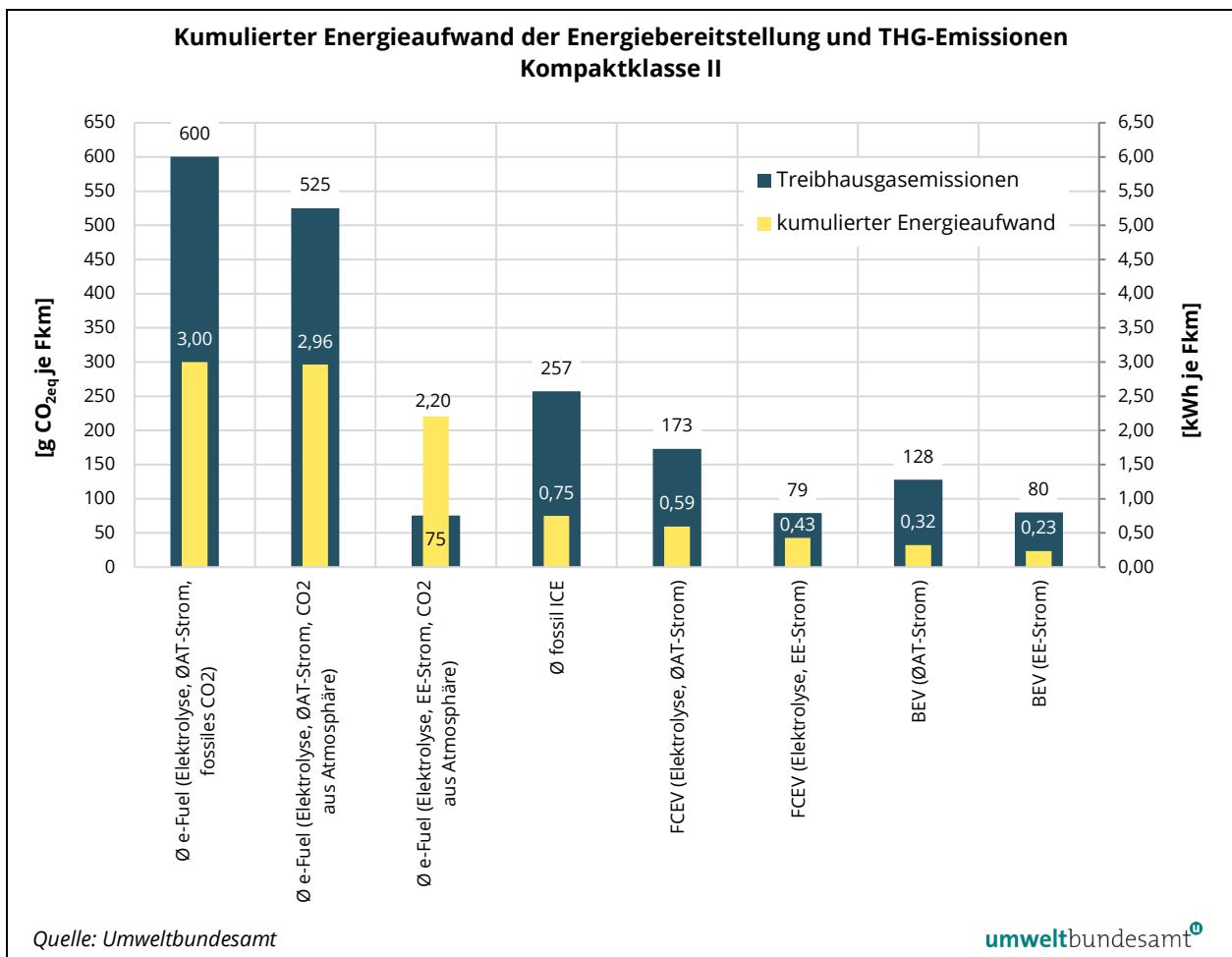
Darüber hinaus belaufen sich die Herstellungskosten für einen Liter synthetischen Kraftstoff derzeit auf ungefähr 4,50 Euro (Adac 2020) und lassen sich nach optimistischen Schätzungen bis 2030 auf 2,29 Euro reduzieren (RUDOLPH 2019). Selbst diese Kosten sind aus heutiger Sicht im Vergleich mit den Alternativen, insbesondere im Vergleich zu Strom bei direktem Einsatz in BEV, nicht konkurrenzfähig.

Berechnung der THG-Emissionen

Wie Abbildung 10 entnommen werden kann, sind synthetische flüssige Kraftstoffe mit THG-Emissionen im Ausmaß von mehr als 500 g CO_{2eq} je gefahrenen Kilometer verbunden. Demgegenüber stehen 173 g CO_{2eq} je Fkm bei der Nutzung eines FCEV bzw. 128 g CO_{2eq} je Fkm bei der Nutzung eines BEV. Diesen Werten liegt zugrunde, dass der erforderliche Wasserstoff via Elektrolyse hergestellt wird, das erforderliche CO₂ der Atmosphäre entnommen wird und über die gesamte Herstellungskette Strom in der durchschnittlichen österreichischen Zusammensetzung zum Einsatz kommt. Die THG-Emissionen eines derartigen e-Fuels sind demnach sogar ungefähr doppelt so hoch wie jene eines konventionellen fossilen Kraftstoffes. Gleichzeitig ist der kumulierte Energieaufwand für e-Fuels um den Faktor 5 bzw. 10 höher als bei FCEV bzw. BEV.

Wird das atmosphärische CO₂ durch CO₂ aus der Verbrennung fossiler Energieträger in Kohlekraftwerken ersetzt, erhöht sich der Emissionsfaktor auf ungefähr 600 g CO_{2eq}. Die Quantifizierung dieses Wertes ist komplex und abhängig von der Art der Allokation. So stellt sich die Frage, ob das CO₂ der produzierten Kilowattstunde Strom oder der produzierten Kilowattstunde e-Fuel zugeordnet wird. Im Prinzip kann das CO₂ zu rund 85 % aus dem Rauchgas eines Kraftwerkes gebunden werden und in der vorliegenden Studie wurde eben dieser Anteil der Produktion des e-Fuel zugeordnet.

Abbildung 11: Vergleich kumulierter Energieaufwand und spezifische THG-Emissionen von e-Fuels im Vergleich zu FCEV und BEV am Beispiel der Kompaktklasse II.



Wird neben atmosphärischem CO₂ über die gesamte Herstellungskette Strom eingesetzt, der ausschließlich aus erneuerbaren Energiequellen stammt, können die THG-Emissionen je gefahrenen Kilometer aus dem Einsatz von e-Fuels auf ein vergleichbar niedriges Niveau gesenkt werden wie bei FCEV und BEV. Der erforderliche kumulierte Energieaufwand ist aber auch in diesem Fall signifikant höher als bei der Nutzung von FCEV bzw. BEV, was auf die zahlreichen Prozessschritte zur Herstellung des e-Fuel und die damit in Verbindung stehenden Einzelwirkungsgrade (siehe Tabelle 10) zurückzuführen ist.

**erhöhter Einsatz von
Primärenergie für
e-Fuels**

Somit erfordert auch der Einsatz von e-Fuels auf Basis erneuerbarer Energie fünf Mal mehr Primärenergie als grüner Wasserstoff bzw. zehn Mal mehr Primärenergie als ein Direkteinsatz des erneuerbaren Stromes in BEV. Dies ist, ausgehend von einem sich zukünftig verknappendem Angebot an erneuerbarem Strom – auch in anderen Sektoren abseits des Verkehrs wird die Nachfrage deutlich zunehmen – ein wesentliches Argument für eine Technologieentscheidung im Mobilitätssektor.

Zusammenfassend ist der Einsatz von e-Fuels technisch machbar, stellt aber aus genannten Gründen mittelfristig keine praktische Option für den Bereich der Pkw dar. Aus dem hohen Primärenergiebedarf lässt sich ableiten, dass e-Fuels nur dort Anwendung finden sollten, wo energieeffizientere Technologien, wie batterieelektrische Antriebe oder brennstoffzellenbasierte Systeme (beispielsweise aufgrund der niedrigen Energiedichte) in ihrem Einsatz beschränkt sind (z. B. im Flugverkehr).

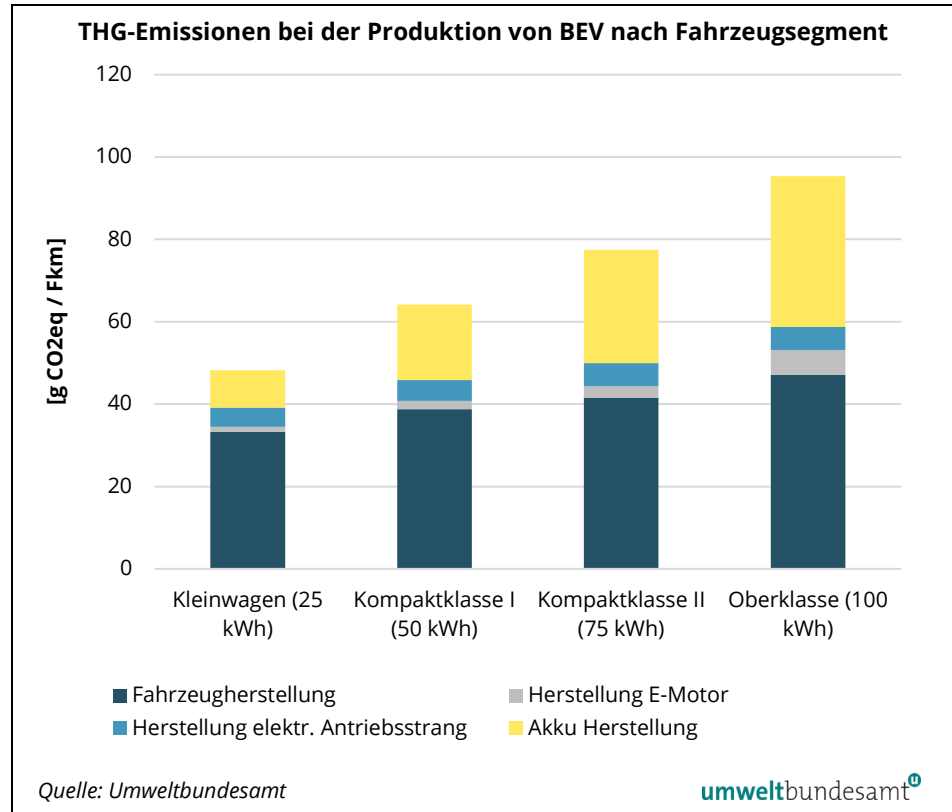
3.4 Bedeutung der Akkukapazität bei BEV

In dieser Studie werden vier unterschiedliche Fahrzeugsegmente unterschieden, die sich im Bereich der BEV insbesondere hinsichtlich der verbauten Akkukapazität unterscheiden. In den Abschnitten des Kapitels „Ergebnisse“ wird der Fokus auf die Kompaktklasse II gelegt, in diesem Kapitel wird die Bedeutung der Akkukapazität im Vergleich aller Segmente diskutiert.

**THG-Emissionen
abhängig vom
Fahrzeugsegment**

Wie Abbildung 11 entnommen werden kann, steigen mit jedem Fahrzeugsegment insbesondere die Emissionen aus der Fahrzeugherstellung (als Folge des steigenden Gewichtes des Grundfahrzeuges) sowie aus der Akkuherstellung (als Folge der zunehmenden Akkukapazität und damit des zunehmenden Materialbedarfs). So verursacht die Herstellung eines BEV im Segment der Kleinwagen die Hälfte der Emissionen, die durch die Herstellung eines BEV der Oberklasse entstehen. Wenngleich diese beiden Segmente untereinander selten substituierbar sind, ist dennoch festzuhalten, dass auch durch die Wahl des Fahrzeugsegmentes nennenswerter Einfluss auf die THG-Emissionen der Fahrzeugherstellung genommen wird.

Abbildung 12:
THG-Emissionen bei der
Produktion von BEV je
Fahrzeugsegment bzw.
mit unterschiedlichen
Batteriekapazitäten.



LITERATURVERZEICHNIS

- ADAC. (19. Dezember 2020). Synthetische Kraftstoffe – Energieträger der Zukunft? Abgerufen am 7. April 2021 von <https://www.adac.de/verkehr/tanken-kraftstoff-antrieb/alternative-antriebe/synthetische-kraftstoffe/#:~:text=Was%20wird%20ein%20Liter%20E,70%20%E2%82%AC%20pro%20Liter%20ein.>
- ANGELINI, A., HEINFELLNER, H., KRUTZLER, T., VOGEL, J., & WINTER, R. (2020). Pathways to a Zero Carbon Transport Sector - Ergebnisbericht. Wien: Umweltbundesamt.
- BKA. (2020). Aus Verantwortung für Österreich - Regierungsprogramm 2020–2024. Wien: Bundeskanzleramt Österreich.
- DAHLLÖF, L., & EMILSSON, E. (2019). Lithium-Ion Vehicle Battery Production Status 2019 on Energy Use, CO₂ Emissions, Use of Metals, Products Environmental Footprint, and Recycling. Stockholm: IVL Swedish Environmental Research Institute.
- DUNN, J. B., JAMES, C., GAINES, L., GALLAGHER, K., KELLY, J. C., & DAI, Q. (2015). Material and Energy Flows in the Production of Cathode and Anode Materials for Lithium Ion Batteries. Argonne National Laboratory.
- ECOINVENT. (2021). ECOINVENT 3.7.
- FERNANDO, E., SATO, K., & NAKATA, T. (2020). Energy Consumption Analysis for Vehicle Production through a Material Flow Approach. MDPI.
- GEMIS. (2021). Globales Emissions-Modell integrierter Systeme, Version 5.0.
- HELMS, H., KÄMPER, C., BIEMANN, K., LAMBRECHT, U., JÖHRENS, J., & MEYER, K. (2019). Klimabilanz von Elektroautos, Einflussfaktoren und Verbesserungspotenzial. Berlin: Agora Verkehrswende.
- MELIN, H. E. (2019). Analysis of the climate impact of lithium-ion batteries and how to measure it. Brüssel: Circular Energy Storage - Research and Consulting.
- MITTERHUEMER, R., & WINTER, R. (2020). Biokraftstoffe im Verkehrssektor 2020. Wien: Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie.
- REUTER, B., HENDRICH, A., HENGSTLER, J., KUPFERSCHMID, S., & SCHWENK, M. (2019). Rohstoffe für innovative Fahrzeugtechnologien - Herausforderungen und Lösungsansätze. 2019: Thinkstep AG.
- RUDOLPH, F. (2019). Der Beitrag von synthetischen Kraftstoffen zur Verkehrswende: Optionen und Prioritäten. Berlin: Greenpeace.

- STATISTIK AUSTRIA. (2021). Kraftfahrzeuge - Neuzulassungen. Abgerufen am 25. März 2021 von https://www.statistik.at/web_de/statistiken/energie_umwelt_innovation_mobilitaet/verkehr/strasse/kraftfahrzeuge_-_neuzulassungen/index.html
- STERNBERG, A., HANK, C., & HEBLING, C. (2019). Treibhausgas-Emissionen für Batterie- und Brennstoffzellenfahrzeuge mit Reichweiten über 300 km. Freiburg: Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE.
- UMWELTBUNDESAMT. (2018). Update: Ökobilanz alternativer Antriebe. Wien: Umweltbundesamt.
- UMWELTBUNDESAMT. (19. Jänner 2021). Treibhausgas-Bilanz Österreichs 2019. Abgerufen am 25. März 2021 von <https://www.umweltbundesamt.at/news210119>
- WAGEMANN, K., & AUSFELDER, F. (2017). White Paper, e-fuels – Mehr als eine Option. Frankfurt am Main: Dechema, Gesellschaft für Chemische Technik und Biotechnologie e.V.

ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS

Akku	Akkumulator (Traktionsbatterie)
BEV	Battery Electric Vehicle (batterieelektrisches Fahrzeug)
CNG	Compressed Natural Gas (Erdgas)
CO ₂	Kohlenstoffdioxid
CO _{2eq}	Kohlenstoffdioxid-Äquivalent: Die Wirkung treibhausgaswirksamer Emissionen wird über das sog. Global Warming Potential umgerechnet und in CO _{2eq} ausgedrückt.
e-fuel	strombasierte Kraftstoffe für Verbrennungskraftmaschinen
FCEV	Fuel Cell Electric Vehicle (Fahrzeug mit Wasserstoff-Brennstoffzellenantrieb)
FTS	Fischer-Tropsch-Synthese
H ₂	Wasserstoff
HEV	Hybrid Electric Vehicle (hybridelektrisches Fahrzeug)
ICE	Internal Combustion Engine (Fahrzeug mit Verbrennungsmotor)
KEA	kumulierter Energieaufwand; stellt den gesamten Primärenergieaufwand von Herstellung, Nutzung und Entsorgung eines Produkts dar
kg	Kilogramm
kWh	Kilowattstunde
Li-Ion	Lithium-Ionen
PGM	Platinum Group Metals
PHEV	Plug-In Electric Vehicle (Plug-In hybridelektrisches Fahrzeug)
Pkw	Personenkraftwagen
THG	Treibhausgas
VKM	Verbrennungskraftmaschine

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abbildung 1: Treibhausgasemissionen je Fahrzeugkilometer in der Kompaktklasse II.....	7
Abbildung 2: Lebenszyklus eines Pkw.....	11
Abbildung 3: Wichtigste Elemente zur Bilanzierung der herstellungsbedingten Emissionen.....	15
Abbildung 4: Darstellung des Energieeinsatzes für die Herstellung eines Li-Ionen-Akkupacks.	19
Abbildung 5: Vergleich der THG-Emissionen über den gesamten Lebenszyklus am Beispiel der Kompaktklasse II, Optionen mit mehr als 35 t CO _{2eq}	27
Abbildung 6: Vergleich der THG-Emissionen über den gesamten Lebenszyklus am Beispiel der Kompaktklasse II, Optionen mit weniger als 35 t CO _{2eq}	28
Abbildung 7: Vergleich der herstellungsbedingten THG-Emissionen in t CO _{2eq} am Beispiel der Kompaktklasse II.....	30
Abbildung 8: Vergleich der THG-Emissionen in g CO _{2eq} am Beispiel der Kompaktklasse II.....	32
Abbildung 9: Vergleich des spezifischen Verbrauchs sowie des kumulierten Energieaufwandes in kWh/Fkm am Beispiel der Kompaktklasse II.	34
Abbildung 10: Vergleich des kumulierten Energieaufwandes von FCEV (grüner H ₂) und BEV in kWh/Fkm am Beispiel der Kompaktklasse II.....	35
Abbildung 11: Vergleich kumulierter Energieaufwand und spezifische THG-Emissionen von e-Fuels im Vergleich zu FCEV und BEV am Beispiel der Kompaktklasse II.	36
Abbildung 12: THG-Emissionen bei der Produktion von BEV je Fahrzeugsegment bzw. mit unterschiedlichen Batteriekapazitäten.	38

TABELLENVERZEICHNIS

Tabelle 1:	Untersuchte Fahrzeugsegmente.	13
Tabelle 2:	Untersuchte Kraftstoffe und Antriebstechnologien.....	13
Tabelle 3:	Materialliste eines durchschnittlichen Pkw mit Beispielmasse 1.500 kg.....	15
Tabelle 4:	Emissionen aus der Herstellung des Grundfahrzeuges.	17
Tabelle 5:	Emissionen aus der Herstellung des Elektromotors.....	17
Tabelle 6:	Emissionen aus der Herstellung des Akkus.	20
Tabelle 7:	Emissionen aus der Herstellung der Brennstoffzelle.....	21
Tabelle 8:	Emissionen aus der Herstellung des Wasserstoffspeichers.	21
Tabelle 9:	Übersicht über die THG-Emissionsfaktoren der wesentlichen Parameter der Fahrzeugherstellung.	22
Tabelle 10:	Übersicht über den Systemwirkungsgrad unterschiedlicher Antriebstechnologien und Kraftstoffe im Bereich Pkw ().	24
Tabelle 11:	Übersicht über die THG-Emissionsfaktoren der wesentlichen Parameter der Energiebereitstellung.....	26
Tabelle 12:	Zur Amortisation der herstellungsbedingten Mehremissionen erforderliche Fahrleistung von BEV und FCEV	29

ANHANG A.1 – ERGEBNISTABELLEN – GESAMTEMISSIONEN**A.1.1: Kleinwagen (in kg CO_{2eq})**

Kleinwagen	Benzin ICE	Benzin HEV	Benzin PHEV	Benzin E-Fuels	Diesel ICE	Diesel HEV	Diesel PHEV	Diesel E-Fuels	CNG ICE	Biomethan ICE	FCEV (Reforming)	FCEV (Elektrolyse, Stromaufbringung)	BEV (Stromaufbringung)	BEV (Erneuerbarer Strom)
Fahrzeugherstellung	8 658	7 937	-	8 658	9 380	-	-	9 380	8 658	8 658	-	-	7 483	7 483
Herstellung E-Motor	-	270	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	270	270
Herstellung elektr. Antriebsstrang	-	210	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1 050	1 050
Akku Herstellung	-	330	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2 062	2 062
Herstellung BZ	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Herstellung H2 Speicher	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Summe Fahrzeug herstellungsbedingte Emissionen	8 658	8 747	-	8 658	9 380	-	-	9 380	8 658	8 658	-	-	10 865	10 865
vorgelagerte THG Emissionen Energiebereitstellung (Treibstoff)	9 612	8 523	-	5 110	8 439	-	-	4 855	8 991	15 404	-	-	-	-
vorgelagerte THG Emissionen Antrieb Stromaufbringung	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	8 379	-
vorgelagerte THG Emissionen Antrieb Erneuerbarer Strom	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	441
Summe Emissionen der Energiebereitstellung	9 612	8 523	-	5 110	8 439	-	-	4 855	8 991	15 404	-	-	8 379	441
Summe direkte Emissionen	34 439	30 535	-	0	34 256	-	-	1 539	27 014	41	-	-	-	-
Summe	52 709	47 805	-	13 768	52 074	-	-	15 773	44 663	24 102	0	0	19 244	11 306

A.1.2: Kompaktklasse I (in kg CO_{2eq})

Kompaktklasse I	Benzin ICE	Benzin HEV	Benzin PHEV	Benzin E-Fuels	Diesel ICE	Diesel HEV	Diesel PHEV	Diesel E-Fuels	CNG ICE	Biomethan ICE	FCEV (Reforming)	FCEV (Elektrolyse, Stromaufbringung)	BEV (Stromaufbringung)	BEV (Erneuerbarer Strom)
Fahrzeugherstellung	10 101	10 101	10 462	10 101	10 823	10 823	11 183	10 823	10 101	10 101	9 353	9 353	8 730	8 730
Herstellung E-Motor	-	361	451	-	-	361	451	-	-	-	451	451	451	451
Herstellung elektr. Antriebsstrang	-	210	1 050	-	-	210	1 050	-	-	-	210	210	1 138	1 138
Akku Herstellung	-	495	1 237	-	-	495	1 237	-	-	-	412	412	4 123	4 123
Herstellung BZ	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	3 000	3 000	-	-
Herstellung H2 Speicher	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	3 060	3 060	-	-
Summe Fahrzeug herstellungsbedingte Emissionen	10 101	11 167	13 200	10 101	10 823	11 888	13 921	10 823	10 101	10 101	16 487	16 487	14 442	14 442
vorgelagerte THG Emissionen Energiebereitstellung (Treibstoff)	10 573	9 612	7 690	5 621	9 179	8 439	6 662	5 280	9 890	16 944	15 245	1 052	-	-
vorgelagerte THG Emissionen Antrieb Stromaufbringung	-	-	3 411	-	-	-	3 411	-	-	-	-	-	10 175	-
vorgelagerte THG Emissionen Antrieb Erneuerbarer Strom	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	536
Summe Emissionen der Energiebereitstellung	10 573	9 612	11 101	5 621	9 179	8 439	10 074	5 280	9 890	16 944	15 245	1 052	10 175	536
Summe direkte Emissionen	37 882	34 439	27 551	379	37 260	34 256	27 044	1 674	29 715	45	-	-	-	-
Summe	58 557	55 217	51 852	16 101	57 262	54 583	51 039	17 777	49 706	27 090	31 732	17 539	24 617	14 978

A.1.3: Kompaktklasse II (in kg CO_{2eq})

Kompaktklasse II	Benzin ICE	Benzin HEV	Benzin PHEV	Benzin E-Fuels	Diesel ICE	Diesel HEV	Diesel PHEV	Diesel E-Fuels	CNG ICE	Biomethan ICE	FCEV (Reforming)	FCEV (Elektrolyse, Stromaufbringung)	BEV (Stromaufbringung)	BEV (Erneuerbarer Strom)
Fahrzeugherstellung	10 101	10 101	10 462	10 101	10 823	10 823	11 183	10 823	10 101	10 101	9 353	9 353	9 353	9 353
Herstellung E-Motor	-	361	451	-	-	361	451	-	-	-	631	631	631	631
Herstellung elektr. Antriebsstrang	-	210	1 050	-	-	210	1 050	-	-	-	210	210	1 260	1 260
Akku Herstellung	-	495	1 237	-	-	495	1 237	-	-	-	412	412	6 185	6 185
Herstellung BZ	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	3 000	3 000	0	0
Herstellung H2 Speicher	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	3 060	3 060	0	0
Summe Fahrzeug herstellungsbedingte Emissionen	10 101	11 167	13 200	10 101	10 823	11 888	13 921	10 823	10 101	10 101	16 667	16 667	17 429	17 429
vorgelagerte THG Emissionen Energiebereitstellung (Treibstoff)	10 573	9 612	7 690	5 621	9 179	8 439	6 662	5 280	9 890	16 944	16 697	1 152	-	-
vorgelagerte THG Emissionen Antrieb Stromaufbringung	-	-	3 411	-	-	-	3 411	-	-	-	-	-	11 372	-
vorgelagerte THG Emissionen Antrieb Erneuerbarer Strom	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	599
Summe Emissionen der Energiebereitstellung	10 573	9 612	11 101	5 621	9 179	8 439	10 074	5 280	9 890	16 944	16 697	1 152	11 372	599
Summe direkte Emissionen	37 882	34 439	27 551	379	37 260	34 256	27 044	1 674	29 715	45	-	-	-	-
Summe	58 557	55 217	51 852	16 101	57 262	54 583	51 039	17 777	49 706	27 090	33 364	17 819	28 801	18 028

A.1.4: Oberklasse (in kg CO_{2eq})

Oberklasse	Benzin ICE	Benzin HEV	Benzin PHEV	Benzin E-Fuels	Diesel ICE	Diesel HEV	Diesel PHEV	Diesel E-Fuels	CNG ICE	Biomethan ICE	FCEV (Re-forming)	FCEV (Elektrolyse, Stromaufbringung)	BEV (Strom-aufbringung)	BEV (Erneuer-barer Strom)
Fahrzeugherstel-lung	12 987	11 544	11 544	12 987	14 430	11 544	11 544	11 544	12 987	12 987	10 601	10 601	10 601	10 601
Herstellung E-Mo-tor	-	541	902	-	-	541	902	-	-	-	1 352	1 352	1 352	1 352
Herstellung elektr. Antriebsstrang	-	210	1 197	-	-	210	1 197	-	-	-	210	210	1 260	1 260
Akku Herstellung	-	495	1 649	-	-	495	1 649	-	-	-	412	412	8 246	8 246
Herstellung BZ	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	3 840	3 840	-	-
Herstellung H2 Speicher	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	3 060	3 060	-	-
Summe Fahrzeug herstellungsbe-dingte Emissionen	12 987	12 790	15 292	12 987	14 430	12 790	15 292	11 544	12 987	12 987	19 475	19 475	21 459	21 459
vorgelagerte THG Emissionen Ener-giebereitstellung (Treibstoff)	12 015	11 374	9 292	6 388	10 364	9 623	8 143	5 962	11 239	19 254	18 875	1 303	-	-
vorgelagerte THG Emissionen Antrieb Stromaufbringung	-	-	4 130	-	-	-	4 130	-	-	-	-	-	13 766	-
vorgelagerte THG Emissionen Antrieb Erneuerbarer Strom	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	725
Summe Emissio-nen der Energie-bereitstellung	12 015	11 374	13 421	6 388	10 364	9 623	12 272	5 962	11 239	19 254	18 875	1 303	13 766	725
Summe direkte Emissionen	43 048	40 752	33 291	430	42 068	39 063	33 054	1 890	33 767	51	-	-	-	-
Summe	68 050	64 916	62 004	19 805	66 862	61 477	60 618	19 396	57 993	32 292	38 350	20 778	35 225	22 184

ANHANG A.2 – ERGEBNISTABELLEN – SPEZIFISCHE EMISSIONEN JE FAHRZEUGKILOMETER

A.2.1: Kleinwagen (in g CO_{2eq} je Fkm)

Kleinwagen	Benzin ICE	Benzin HEV	Benzin PHEV	Benzin E-Fuels	Diesel ICE	Diesel HEV	Diesel PHEV	Diesel E-Fuels	CNG ICE	Biomethan ICE	FCEV (Reforming)	FCEV (Elektrolyse, Stromaufbringung)	BEV (Stromaufbringung)	BEV (Erneuerbarer Strom)
Fahrzeugherstellung	38	35	-	38	42	-	-	42	38	38	-	-	33	33
Herstellung E-Motor	-	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	1
Herstellung elektr. Antriebsstrang	-	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	5	5
Akku Herstellung	-	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	9	9
Herstellung BZ	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Herstellung H2 Speicher	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Summe Fahrzeug herstellungsbedingte Emissionen	38	39	-	38	42	-	-	42	38	38	-	-	48	48
direkte THG Emissionen	153	136	-	-	152	-	0	7	120	0	-	-	-	-
vorgelagerte THG Emissionen Energiebereitstellung	43	38	-	23	38	-	0	22	40	68	-	-	-	-
Emissionen Antrieb Stromaufbringung	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	37	-
Emissionen Antrieb Erneuerbarer Strom	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2
Summe laufende Emissionen	196	174	-	23	190	-	-	28	160	69	-	-	37	2
gesamte Emissionen	234,3	212,5	-	61,2	231,4	-	-	70,1	198,5	107,1	-	-	85,5	50,2

A.2.2: Kompaktklasse I (in g CO_{2eq} je Fkm)

Kompaktklasse I	Benzin ICE	Benzin HEV	Benzin PHEV	Benzin E-Fuels	Diesel ICE	Diesel HEV	Diesel PHEV	Diesel E-Fuels	CNG ICE	Biomethan ICE	FCEV (Reforming)	FCEV (Elektrolyse, Stromaufbringung)	BEV (Stromaufbringung)	BEV (Erneuerbarer Strom)
Fahrzeugherstellung	45	45	46	45	48	48	50	48	45	45	42	42	39	39
Herstellung E-Motor	-	2	2	-	-	2	2	-	-	-	2	2	2	2
Herstellung elektr. Antriebsstrang	-	1	5	-	-	1	5	-	-	-	1	1	5	5
Akku Herstellung	-	2	5	-	-	2	5	-	-	-	2	2	18	18
Herstellung BZ	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	13	13	-	-
Herstellung H2 Speicher	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	14	14	-	-
Summe Fahrzeug herstellungsbedingte Emissionen	45	50	59	45	48	53	62	48	45	45	73	73	64	64
direkte THG Emissionen	168	153	122	2	166	152	120	7	132	0	-	-	-	-
vorgelagerte THG Emissionen Energiebereitstellung	47	43	34	25	41	38	30	23	44	75	68	5	-	-
Emissionen Antrieb Stromaufbringung	-	-	15	-	-	-	15	-	-	-	-	-	45	0
Emissionen Antrieb Erneuerbarer Strom	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2
Summe laufende Emissionen	215	196	172	27	206	190	165	31	176	76	68	5	45	2
gesamte Emissionen	260,3	245,4	230,5	71,6	254,5	242,6	226,8	79,0	220,9	120,4	141,0	77,9	109,4	66,6

A.2.3: Kompaktklasse II (in g CO_{2eq}je Fkm)

Kompaktklasse II	Benzin ICE	Benzin HEV	Benzin PHEV	Benzin E-Fuels	Diesel ICE	Diesel HEV	Diesel PHEV	Diesel E-Fuels	CNG ICE	Biomethan ICE	FCEV (Reforming)	FCEV (Elektrolyse, Stromaufbringung)	BEV (Stromaufbringung)	BEV (Erneuerbarer Strom)
Fahrzeugherstellung	45	45	46	45	48	48	50	48	45	45	42	42	42	42
Herstellung E-Motor	-	2	2	-	-	2	2	-	-	-	3	3	3	3
Herstellung elektr. Antriebsstrang	-	1	5	-	-	1	5	-	-	-	1	1	6	6
Akku Herstellung	-	2	5	-	-	2	5	-	-	-	2	2	27	27
Herstellung BZ	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	13	13	-	-
Herstellung H2 Speicher	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	14	14	-	-
Summe Fahrzeug herstellungsbedingte Emissionen	45	50	59	45	48	53	62	48	45	45	74	74	77	77
direkte THG Emissionen	168	153	122	2	166	152	120	7	132	0	-	-	-	-
vorgelagerte THG Emissionen Energiebereitstellung	47	43	34	25	41	38	30	23	44	75	74	5	-	-
Emissionen Antrieb Stromaufbringung	-	-	15	-	-	-	15	-	-	-	-	-	51	0
Emissionen Antrieb Erneuerbarer Strom	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	3
Summe laufende Emissionen	215	196	172	27	206	190	165	31	176	76	74	5	51	3
gesamte Emissionen	260,3	245,4	230,5	71,6	254,5	242,6	226,8	79,0	220,9	120,4	148,3	79,2	128,0	80,1

A.2.4: Oberklasse (in kg CO_{2eq} je Fkm)

Oberklasse	Benzin ICE	Benzin HEV	Benzin PHEV	Benzin E-Fuels	Diesel ICE	Diesel HEV	Diesel PHEV	Diesel E-Fuels	CNG ICE	Biomethan ICE	FCEV (Reforming)	FCEV (Elektrolyse, Stromaufbringung)	BEV (Stromaufbringung)	BEV (Erneuerbarer Strom)
Fahrzeugherstellung	58	51	51	58	64	51	51	51	58	58	47	47	47	47
Herstellung E-Motor	-	2	4	-	-	2	4	-	-	-	6	6	6	6
Herstellung elektr. Antriebsstrang	-	1	5	-	-	1	5	-	-	-	1	1	6	6
Akku Herstellung	-	2	7	-	-	2	7	-	-	-	2	2	37	37
Herstellung BZ	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	17	17	-	-
Herstellung H2 Speicher	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	14	14	-	-
Summe Fahrzeug herstellungsbedingte Emissionen	58	57	68	58	64	57	68	51	58	58	87	87	95	95
direkte THG Emissionen	191	181	148	2	187	174	147	8	150	0	-	-	-	-
vorgelagerte THG Emissionen Energiebereitstellung	53	51	41	28	46	43	36	26	50	86	84	6	-	-
Emissionen Antrieb Stromaufbringung	-	-	18	-	-	-	18	-	-	-	-	-	61	-
Emissionen Antrieb Erneuerbarer Strom	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	3
Summe laufende Emissionen	245	232	208	30	233	216	201	35	200	86	84	6	61	3
gesamte Emissionen	302,4	288,5	275,6	88,0	297,2	273,2	269,4	86,2	257,7	143,5	170,4	92,3	156,6	98,6

ANHANG B – EINGANGSPARAMETER

B.1: Kleinwagen

Kleinwagen	Benzin ICE	Benzin HEV	Benzin PHEV	Benzin E-Fuels	Diesel ICE	Diesel HEV	Diesel PHEV	Diesel E-Fuels	CNG ICE	Biomethan ICE	FCEV (Reforming)	FCEV (Elektrolyse, Stromaufbringung)	BEV (Stromaufbringung)	BEV (Erneuerbarer Strom)
Gewicht [kg]	1 200	1 100	-	1 200	1 300	-	-	1 300	1 200	1 200	-	-	1 200	1 200
E-Motor [kW]	-	60	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	60	60
Antriebsstrang [kg]	-	5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	25	25
Akku [kWh]	-	4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	25	25
FC [kW]	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
H ₂ Speicher [kg]	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Fossiler Verbrauch [kWh/km]	0,60	0,53	-	0,60	0,57	-	-	0,57	0,60	0,60	-	-	-	-
Elektrischer Verbrauch [kWh/km]	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,14	0,14

B.2: Kompaktklasse I

Kompaktklasse I	Benzin ICE	Benzin HEV	Benzin PHEV	Benzin E-Fuels	Diesel ICE	Diesel HEV	Diesel PHEV	Diesel E-Fuels	CNG ICE	Biomethan ICE	FCEV (Reforming)	FCEV (Elektrolyse, Stromaufbringung)	BEV (Stromaufbringung)	BEV (Erneuerbarer Strom)
Gewicht [kg]	1 400	1 400	1 450	1 400	1 500	1 500	1 550	1 500	1 400	1 400	1 500	1 500	1 400	1 400
E-Motor [kW]	-	80	100	-	-	80	100	-	-	-	100	100	100	100
Antriebsstrang [kg]	-	5	25	-	-	5	25	-	-	-	5	5	27	27
Akku [kWh]	-	6	15	-	-	6	15	-	-	-	5	5	50	50
FC [kW]	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	100	100	-	-
H ₂ Speicher [kg]	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	6	6	-	-
Fossiler Verbrauch [kWh/km]	0,66	0,60	0,48	0,66	0,62	0,57	0,45	0,63	0,66	0,66	-	-	-	-
Elektrischer Verbrauch [kWh/km]	-	-	0,06	-	-	-	0,06	-	-	-	0,21	0,21	0,17	0,17

B.3: Kompaktklasse II

Kompaktklasse II	Benzin ICE	Benzin HEV	Benzin PHEV	Benzin E-Fuels	Diesel ICE	Diesel HEV	Diesel PHEV	Diesel E-Fuels	CNG ICE	Biomethan ICE	FCEV (Reforming)	FCEV (Elektrolyse, Stromaufbringung)	BEV (Stromaufbringung)	BEV (Erneuerbarer Strom)
Gewicht [kg]	1 400	1 400	1 450	1 400	1 500	1 500	1 550	1 500	1 400	1 400	1 500	1 500	1 500	1 500
E-Motor [kW]	-	80	100	-	-	80	100	-	-	-	140	140	140	140
Antriebsstrang [kg]	-	5	25	-	-	5	25	-	-	-	5	5	30	30
Akku [kWh]	-	6	15	-	-	6	15	-	-	-	5	5	75	75
FC [kW]	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	100	100	-	-
H ₂ Speicher [kg]	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	6	6	-	-
Fossiler Verbrauch [kWh/km]	0,66	0,60	0,48	0,66	0,62	0,57	0,45	0,63	0,66	0,66	-	-	-	-
Elektrischer Verbrauch [kWh/km]	-	-	0,06	-	-	-	0,06	-	-	-	0,23	0,23	0,19	0,19

B.4: Oberklasse

Oberklasse	Benzin ICE	Benzin HEV	Benzin PHEV	Benzin E-Fuels	Diesel ICE	Diesel HEV	Diesel PHEV	Diesel E-Fuels	CNG ICE	Biomethan ICE	FCEV (Re-forming)	FCEV (Elektrolyse, Stromauf-bringung)	BEV (Strom-auf-bringung)	BEV (Erneu-erbarer Strom)
Gewicht [kg]	1 800	1 600	1 600	1 800	2 000	1 600	1 600	1 600	1 800	1 800	1 700	1 700	1 700	1 700
E-Motor [kW]	-	120	200	-	-	120	200	-	-	-	300	300	300	300
Antriebsstrang [kg]	-	5	29	-	-	5	29	-	-	-	5	5	30	30
Akku [kWh]	-	2	20	-	-	2	20	-	-	-	5	5	100	100
FC [kW]	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	128	128	-	-
H ₂ Speicher [kg]	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	6	6	-	-
Fossiler Ver- brauch [kWh/km]	0,75	0,71	0,58	0,75	0,70	0,65	0,55	0,70	0,75	0,75	-	-	-	-
Elektrischer Ver- brauch [kWh/km]	-	-	0,07	-	-	-	0,07	-	-	-	0,26	0,26	0,23	0,23

Umweltbundesamt GmbH

Spittelauer Lände 5
1090 Wien/Österreich

Tel.: +43-(0)1-313 04

Fax: +43-(0)1-313 04/5400

office@umweltbundesamt.at

www.umweltbundesamt.at

Die Ökobilanz zeigt die Klimaverträglichkeit verschiedener Pkw-Antriebsformen. Dafür wurden Treibhausgas-Emissionen und Energieaufwand verglichen. Berücksichtigt wurden sowohl die vor- und nachgelagerten Emissionen, die bei der Herstellung des Fahrzeugs und des Energieträgers entstehen, als auch die direkten Emissionen aus dem Fahrbetrieb.

Die Analyse von 39 unterschiedlichen Kombinationen von Antriebstechnologien, Kraftstoffen und Fahrzeugsegmenten zeigt, dass batterieelektrische Pkw (BEV) bei Einsatz von 100 % Strom aus erneuerbaren Energiequellen in allen Fahrzeugsegmenten am klimafreundlichsten sind. Alternative Technologien wie Wasserstoffantriebe weisen ähnlich niedrige Treibhausgasemissionen auf, haben aber eine niedrigere Energieeffizienz als BEV.

Downsizing, ressourcenschonende Produktion und Recycling helfen, die Ökobilanz von Elektroautos weiter zu verbessern.