

DIE ÖKOBILANZ VON SCHWEREN NUTZFAHRZEUGEN UND BUSSEN

***Bewertung ausgesuchter Anwendungsfälle
alternativer Antriebskonzepte hinsichtlich
Reduktionspotenzial von CO₂-Emissionen und
Energieverbrauch***

Fritz David
Heinfellner Holger
Lambert Stefan

BARRIEREFREIE ZUSAMMENFASSUNG
REP-0801

WIEN 2022

ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS

BEV	Battery Electric Vehicle (batterieelektrisches Fahrzeug)
CNG	Compressed Natural Gas (Erdgas)
EE.....	Erneuerbare Energie
LNG	Liquefied Natural Gas (verflüssigtes Erdgas)
CO ₂	Kohlenstoffdioxid
CO ₂ -eq.....	Kohlenstoffdioxid-Äquivalent: Die Wirkung treibhausgaswirksamer Emissionen wird über das sog. Global Warming Potential umgerechnet und in CO ₂ -eq ausgedrückt
e-Fuel	Strombasierte Kraftstoffe für Verbrennungskraftmaschinen
ERS.....	Electric Road System, z. B. Stromversorgung mittels Oberleitung
FCEV	Fuel Cell Electric Vehicle (Fahrzeug mit H ₂ -Brennstoffzellenantrieb)
Fkm.....	Ein Fahrzeugkilometer (Fkm) ist die Maßeinheit für die Bewegung eines Fahrzeuges über eine Entfernung von einem Kilometer
FTS.....	Fischer-Tropsch-Synthese
H ₂	Wasserstoff
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
LSV.....	Linienbus im Stadtverkehr
MLV	Mittelschwerer Lkw im urbanen Verteilerverkehr
OL.....	Oberleitung
ONC.....	Overnight Charging; das Fahrzeug lädt nach dem betrieblichen Einsatz, z. B. über Nacht

OPC	Opportunity Charging; das Fahrzeug lädt auch während des betrieblichen Einsatz, z. B. untertags (nach)
Pkm	Ein Personenkilometer (Pkm) ist die Maßeinheit für die Beförderung einer Person über eine Entfernung von einem Kilometer
PGM.....	Platinum Group Metals
Pkw.....	Personenkraftwagen
RÜV.....	Regionalbus im Überlandverkehr
SLT	Schwerer Lkw im Transitverkehr
THG	Treibhausgas
Tkm	Ein Tonnenkilometer (Tkm) ist eine Maßeinheit für den Güterverkehr, die für die Beförderung einer Tonne Güter über eine Entfernung von einem Kilometer steht

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 17 verschiedene Technologie- und Kraftstoffoptionen im Bereich der schweren Nutzfahrzeuge und Busse analysiert. Dabei wurden unterschiedliche Antriebstechnologien (ICE, FCEV, BEV und Hybride daraus) und Kraftstoffe (fossil flüssig und gasförmig, synthetisch flüssig, „grüner“ Wasserstoff, unterschiedliche Stromquellen) geprüft. Aufgrund der hohen Anzahl möglicher Fahrzeugkonfigurationen in den untersuchten Fahrzeugkategorien wurden vier Anwendungsfälle definiert:

- Mittelschwerer Lkw (27 t) im urbanen Verteilerverkehr (MLV)
- Schwerer Lkw (40 t) im Transitverkehr (SLT)
- Linienbus (12 m) im Stadtverkehr (LSV)
- Regionalbus (12 m) im Überlandverkehr (RÜV)

herstellungsbedingte Emissionen

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

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

Die so ermittelten Emissionswerte unterlagen höheren Schwankungen in Abhängigkeit von den zugrunde gelegten Annahmen und wurden deshalb in den meisten Fällen in Bandbreiten ausgewiesen. Ergänzend zu den genannten Fahrzeugkomponenten wurden die Emissionen aus der Bereitstellung der erforderlichen Energie (von fossilen Kraftstoffen bis zu erneuerbarem Strom) bilanziert.

Der größte Hebel zur Vermeidung von Treibhausgasemissionen (THG-Emissionen) liegt dabei im eingesetzten Energiemix entlang der Herstellungskette, insbesondere in der Zusammensetzung des eingesetzten Stromes. Entscheidend ist zudem der Ersatz von Primärrohstoffen durch Rohstoffe, die wiederverwertet werden (Sekundärrohstoffe). Für die Emissionen aus der Energiebereitstellung wurden Bandbreiten ermittelt, da die diesbezüglichen Emissionen bei Strom, Wasserstoff und strombasierten synthetischen Kraftstoffen teils deutlich variieren können.

**BEV (inkl. Oberleitung)
mit 100 % Strom aus
erneuerbaren Energien
erreichen die
niedrigsten Emissionen**

Die Studie kommt zu dem Ergebnis, dass batterieelektrische bzw. (im Fall des SLT) via Oberleitung geladene Fahrzeuge bei Einsatz von 100 % Strom aus erneuerbaren Energiequellen in allen untersuchten Anwendungsfällen die niedrigsten THG-Emissionen verursachen. Bei den batterieelektrischen Fahrzeugen können die Emissionen zudem durch den Einsatz kleinerer Akkumulatoren in Kombination mit sogenanntem Opportunity Charging (also Zwischenladung auf der Strecke) reduziert werden. So beträgt die Bandbreite bei MLV zwischen 23 g CO₂-eq je Tonnenkilometer und 29 g CO₂-eq je Tonnenkilometer in Abhängigkeit der verbauten Batteriekapazität und rund 8 g CO₂-eq je Tonnenkilometer bei einem SLT, der via Oberleitung mit erneuerbarem Strom versorgt wird.

Die Differenz ergibt sich daraus, dass SLT eine höhere durchschnittliche Beladung aufweisen als MLV, wodurch die Gesamtemissionen in Bezug auf die transportierte Tonne niedriger sind. Bei batterieelektrischen Bussen auf Basis erneuerbaren Stroms beträgt die Bandbreite 5 g CO₂-eq je Personenkilometer für einen Linienbus mit kleiner Batterie und 12 g CO₂-eq je Personenkilometer für einen Regionalbus mit großer Batterie. Ähnlich niedrige Werte können mit Fahrzeugen erreicht werden, die mit Wasserstoff-Brennstoffzelle betrieben werden (FCEV), sofern der erforderliche Wasserstoff via Elektrolyse und unter Einsatz von 100 % Strom aus erneuerbaren Energiequellen generiert wird.

**kumulierter
Energieaufwand für
e-Fuels um Faktor 6
höher als bei BEV**

Die künftig zu erwartende hohe Nachfrage nach erneuerbarer Energie in allen Wirtschaftssektoren erfordert einen möglichst effizienten Energieeinsatz. Dieser Aspekt wird bei schweren Nutzfahrzeugen und Bussen den Einsatz strombasierter flüssiger synthetischer Kraftstoffen, sogenannter „e-Fuels“, limitieren. Zwar liegen die THG-Emissionen beim Einsatz derartiger Kraftstoffe nur geringfügig über jenen von Elektrofahrzeugen mit erneuerbarer Energie. Der kumulierte Energieaufwand ist jedoch je nach Anwendungsfall um den Faktor 5,5 bis 6,5 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).

Ähnliches gilt für Biokraftstoffe, die zwar eine höhere Energieeffizienz aufweisen als e-Fuels – der kumulierte Energieaufwand ist aber dennoch zwei- bis dreimal höher als bei BEV. Die begrenzte Verfügbarkeit der Rohstoffe für Biokraftstoffe ebenso wie die technischen und rechtlichen Restriktionen in Zusammenhang mit der erforderlichen Fahrzeugumrüstung bzw. -freigabe zum Betrieb mit reinen Biokraftstoffen stehen ebenfalls einem intensiven Einsatz entgegen.

**Infrastruktur
außerhalb der
Systemgrenzen**

Die Infrastruktur, die für den Einsatz der unterschiedlichen Technologie- und Kraftstoffoptionen erforderlich ist, reicht von LNG-Tankstellen über die Produktionsanlagen für synthetische Kraftstoffe bis hin zu Oberleitungssystemen auf dem hochrangigen Straßenverkehrsnetz. Die Bilanzierung der Infrastruktur liegt jedoch außerhalb der Systemgrenzen dieser Studie und wurde dementsprechend nicht durchgeführt.

Elektrofahrzeuge verursachen bis zu 89 % weniger THG-Emissionen als konventionelle Fahrzeuge

Zusammenfassend ergibt sich in allen untersuchten Anwendungsfällen ein klarer Klimavorteil für batterieelektrische Fahrzeuge (inkl. Oberleitungslösungen), vor allem, wenn für die Energiebereitstellung Strom aus erneuerbaren Quellen (etwa nach Umweltzeichen 46) herangezogen wird: Im Vergleich zu rein fossil angetriebenen Lkw und Bussen verursachen Elektrofahrzeuge über den gesamten Lebenszyklus je nach Größe des verbauten Akkumulators zwischen 82 % und 89 % weniger THG-Emissionen als dieselbetriebene Fahrzeuge bzw. zwischen 79 % und 87 % weniger THG-Emissionen als Fahrzeuge, die mit fossilem Erdgas (CNG) betrieben werden.

Abbildung A: Vergleich der spezifischen THG-Emissionen je Tonnenkilometer, MLV.

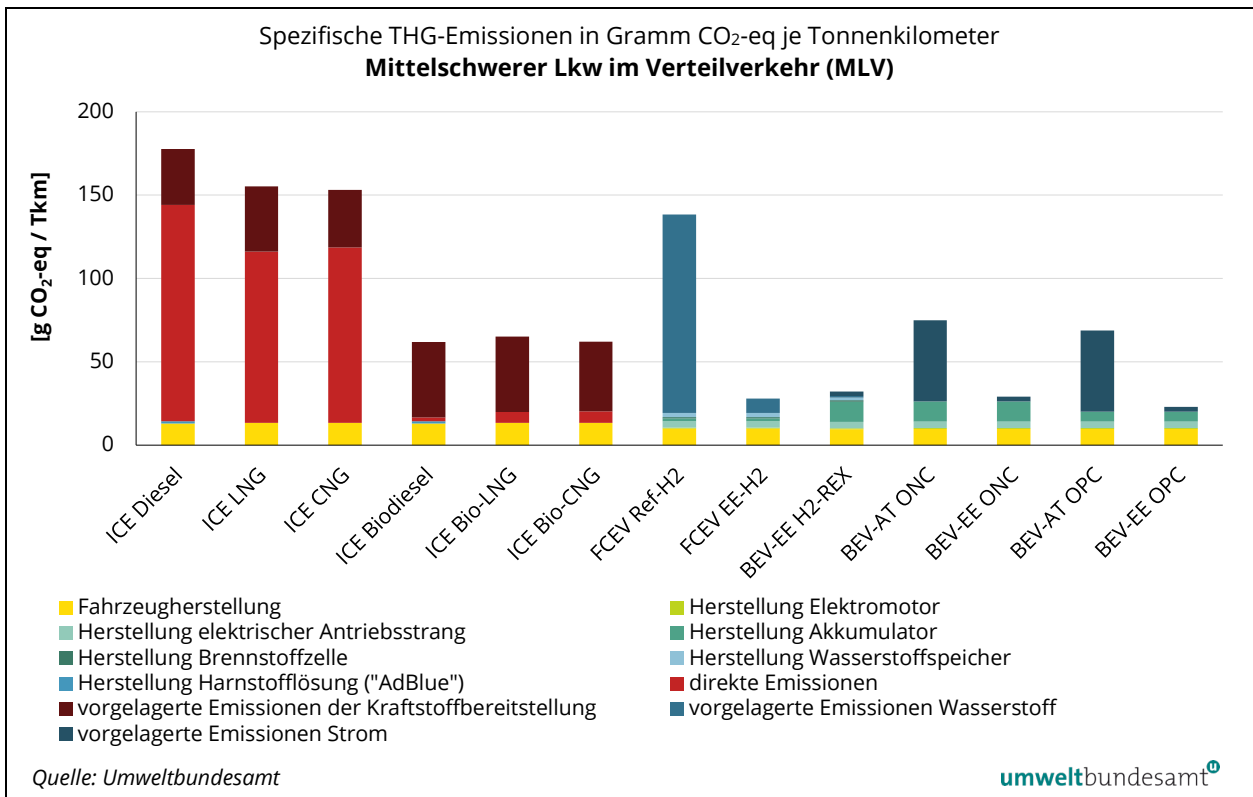


Abbildung B: Vergleich der spezifischen THG-Emissionen je Tonnenkilometer, SLT.

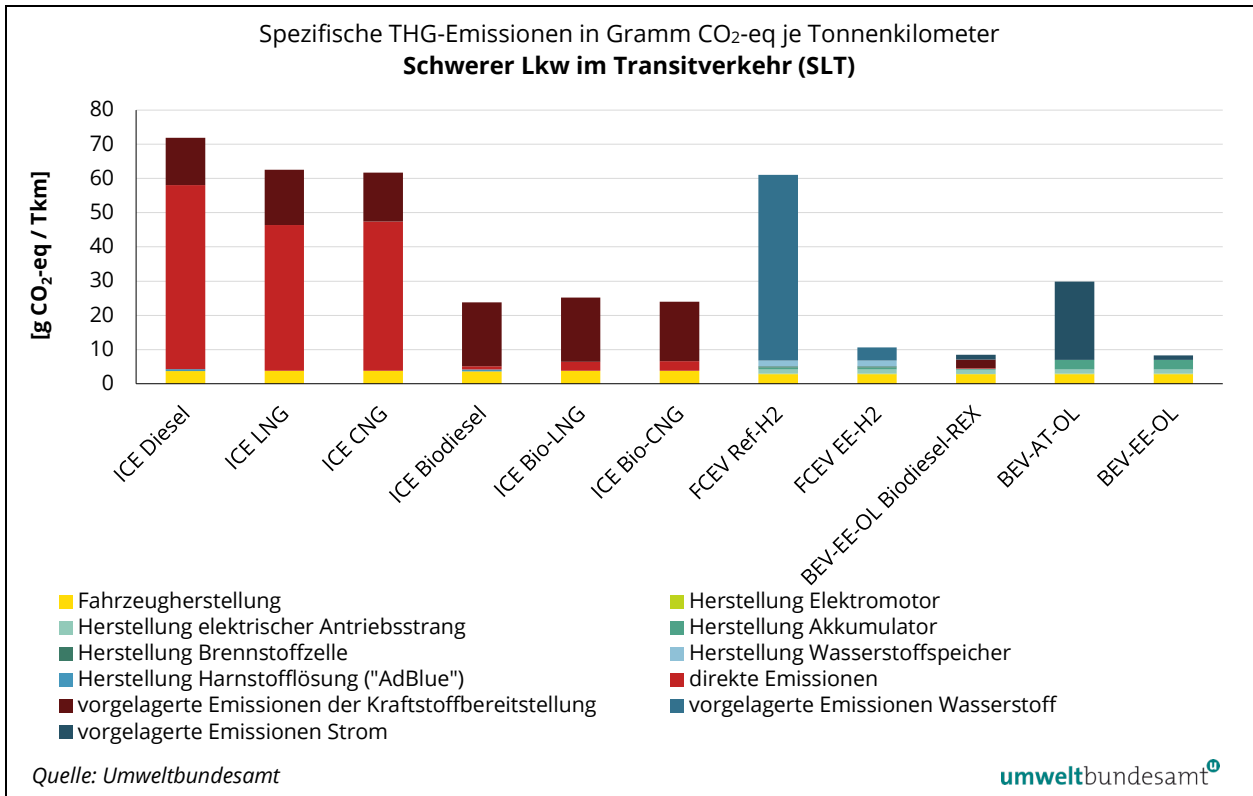


Abbildung C: Vergleich der spezifischen THG-Emissionen je Personenkilometer, LSV.

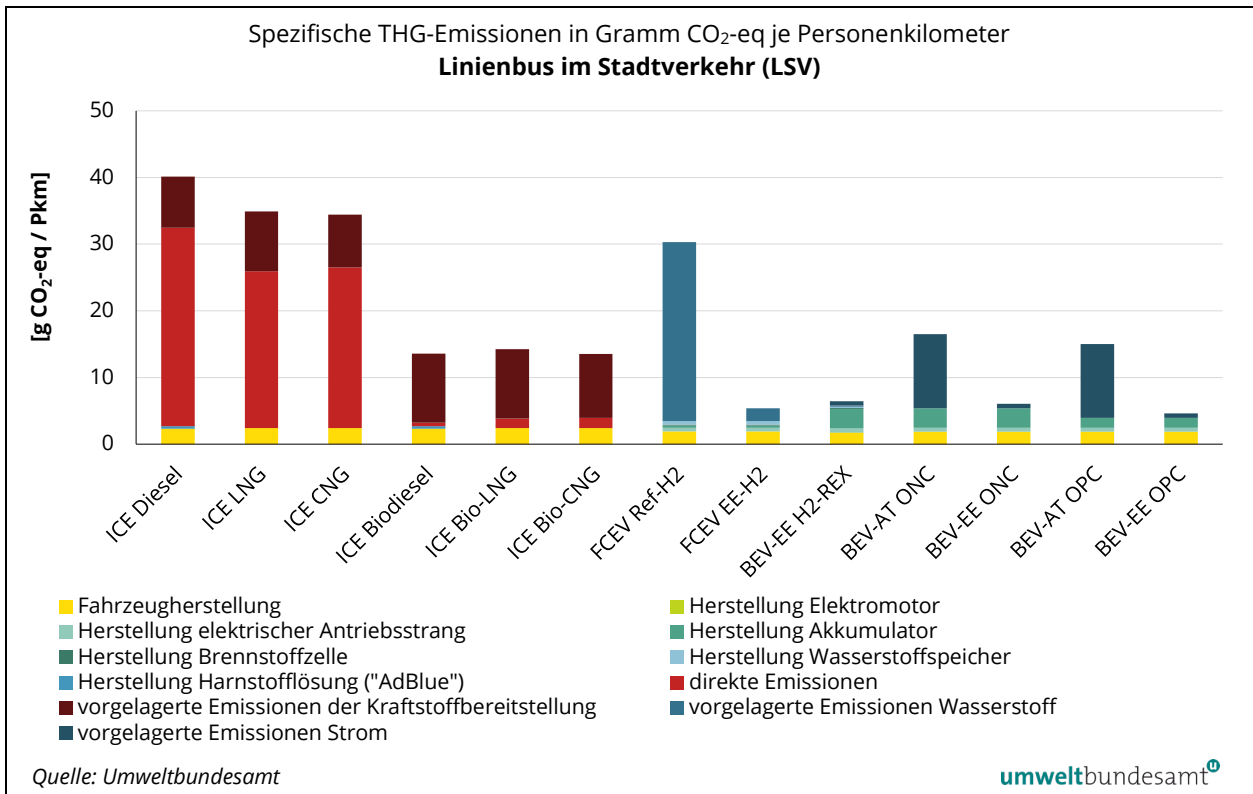
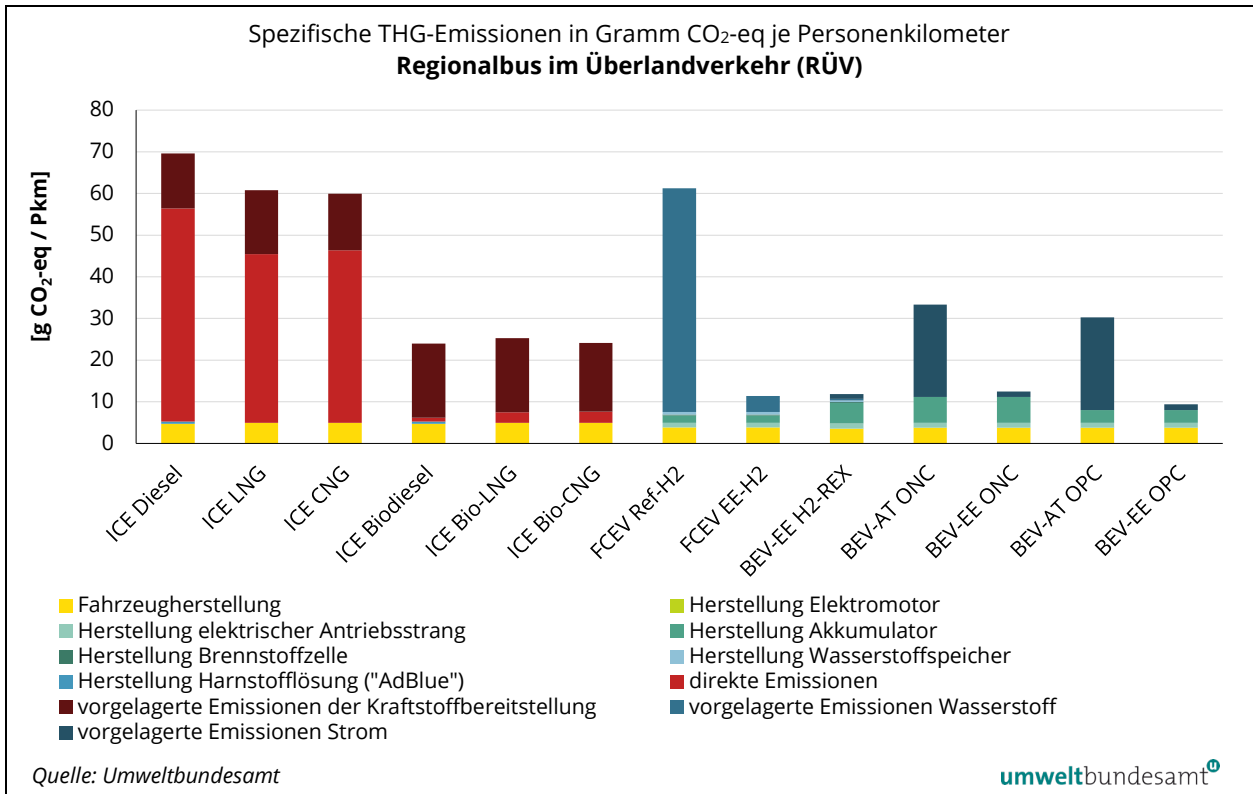


Abbildung D: Vergleich der spezifischen THG-Emissionen je Personenkilometer, RÜV.



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 terms of climate 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

In this life cycle analysis, 17 different technology and fuel options were analysed in the field of heavy commercial vehicles and buses. Different propulsion technologies (ICE, FCEV, BEV and hybrids thereof) and fuels (fossil liquid and gaseous, synthetic liquid, "green" hydrogen, different electricity sources) were considered. Due to the high number of possible vehicle configurations in the vehicle categories examined, four use cases were defined:

- Medium truck (27 tonnes) in distribution traffic (MLV)
- Heavy truck (40 tonnes) in transit (SLT)
- City bus (12 meters) (LSV)
- Regional Bus (12 meters) in intercity transport (RÜV)

Production related emissions

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 (BEV, FCEV)
- electric powertrain and battery pack/accumulator (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. In addition to the vehicle components mentioned, the emissions from the production of the required energy (from fossil fuels to renewable electricity) were examined.

The most powerful levers to 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.

BEV (incl. catenary systems) with 100 % electricity from renewable energies achieve the lowest emissions

The study comes to the conclusion that battery electric vehicles or (in the case of the SLT) vehicles charged via catenary line, when using 100% electricity from renewable energy sources, cause the lowest GHG emissions in all the use cases examined. In the case of battery electric vehicles, emissions can also be reduced by using smaller batteries in combination with so-called opportunity charging (i.e. intermediate charging on the way). The range for MLVs is between 23 g CO₂-eq per tonne-kilometre and 29 g CO₂-eq per tonne-kilometre, depending on the battery capacity installed, and around 8 g CO₂-eq per tonne-kilometre for an SLT supplied with renewable electricity via an overhead line. The difference results from the fact that SLTs have a higher average load than MLVs, which means that the total emissions in relation to the transported tonne are lower. For battery-electric buses based on renewable electricity, the range is 5 g CO₂-eq per passenger-kilometre for a regular bus with a small battery and 12 g CO₂-eq per passenger-kilometre for a regional bus with a large battery. Similarly low values can be achieved with vehicles powered by hydrogen fuel cells (FCEVs), if the required hydrogen is generated via electrolysis and also using 100% electricity from renewable energy sources.

Cumulative energy demand for e-fuels is 6 times higher than for BEVs

The high demand for renewable energy that is expected in the future in all sectors of the economy requires the most efficient use of this energy. This aspect will also limit the use of electricity-based liquid synthetic fuels, so-called "e-fuels", in the vehicle categories of heavy commercial vehicles and buses. The GHG emissions from the use of such fuels are only slightly higher than those resulting from the use of electric vehicles with renewable energy. However, depending on the application, the cumulative energy input is 5.5 to 6.5 times higher than for BEVs. Therefore, the use of e-fuels should be focused on those transport modes and vehicle categories where battery-electric drives or fuel cell-based systems are limited in their use (e.g. air traffic).

The same applies to biofuels, which have a higher energy efficiency - but the cumulative energy input is 2 to 3 times higher than for BEVs. The limited availability of raw materials for biofuels, as well as technical and legal restrictions regarding the necessary vehicle conversion or approval for operation with pure biofuels, also stand in the way of intensive use.

Infrastructure outside the scope of the study

The infrastructure required for the deployment of the different technology and fuel options ranges from LNG refuelling stations and synthetic fuel production facilities to catenary line systems on the high-level road network. However, the analysis of the infrastructure lies outside the scope of this study and was accordingly not carried out.

Electric vehicles cause up to 89% less GHG emissions than conventional vehicles

Overall, there is a clear climate advantage for battery electric vehicles (incl. overhead line solutions) in all use cases examined, especially if electricity from renewable sources (e.g. according to eco-label 46) is used for the energy supply: Compared to purely fossil-fuelled heavy commercial vehicles and buses, electric vehicles cause between 82% and 89% less GHG emissions over the entire life cycle than diesel-powered vehicles, or between 79% and 87% less GHG emissions than vehicles powered by fossil natural gas (CNG), depending on the size of the battery installed.

Figure A: Comparison of specific GHG emissions per tonne-kilometre, medium truck

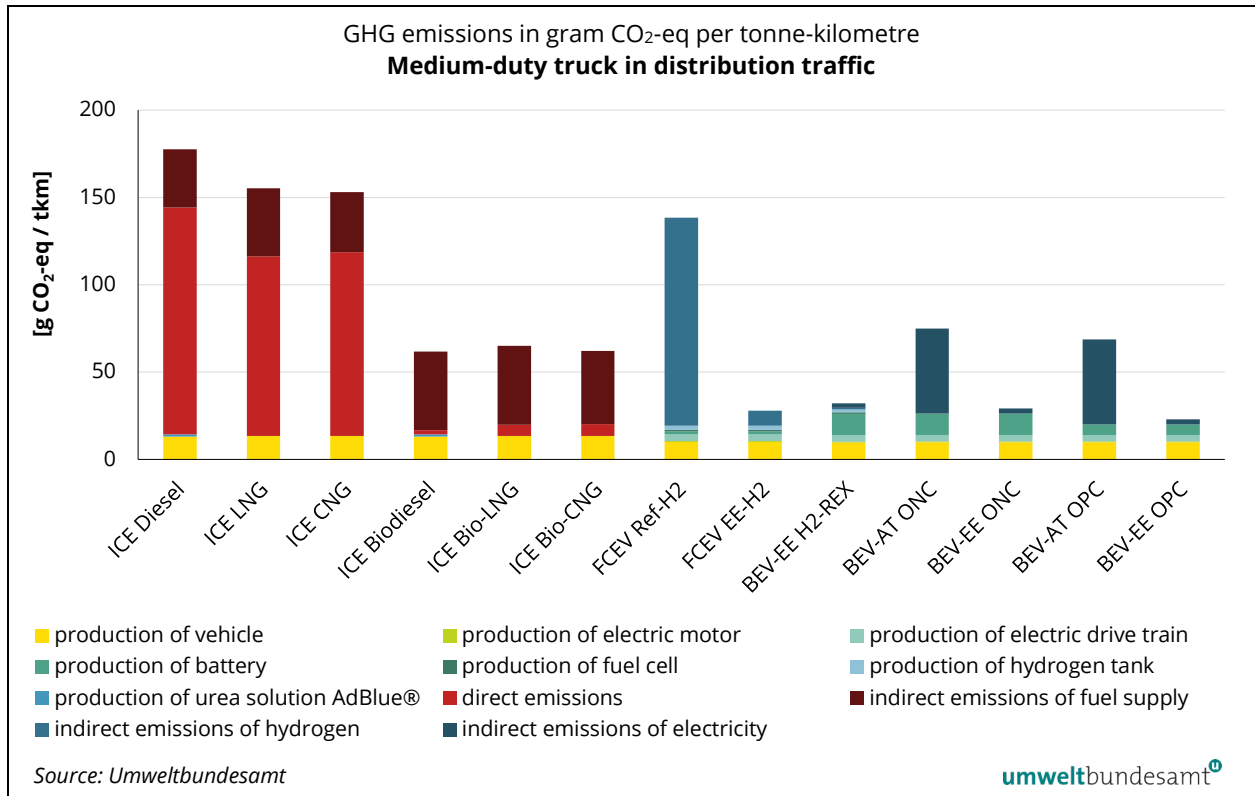


Figure B: Comparison of specific GHG emissions per tonne-kilometre, heavy truck

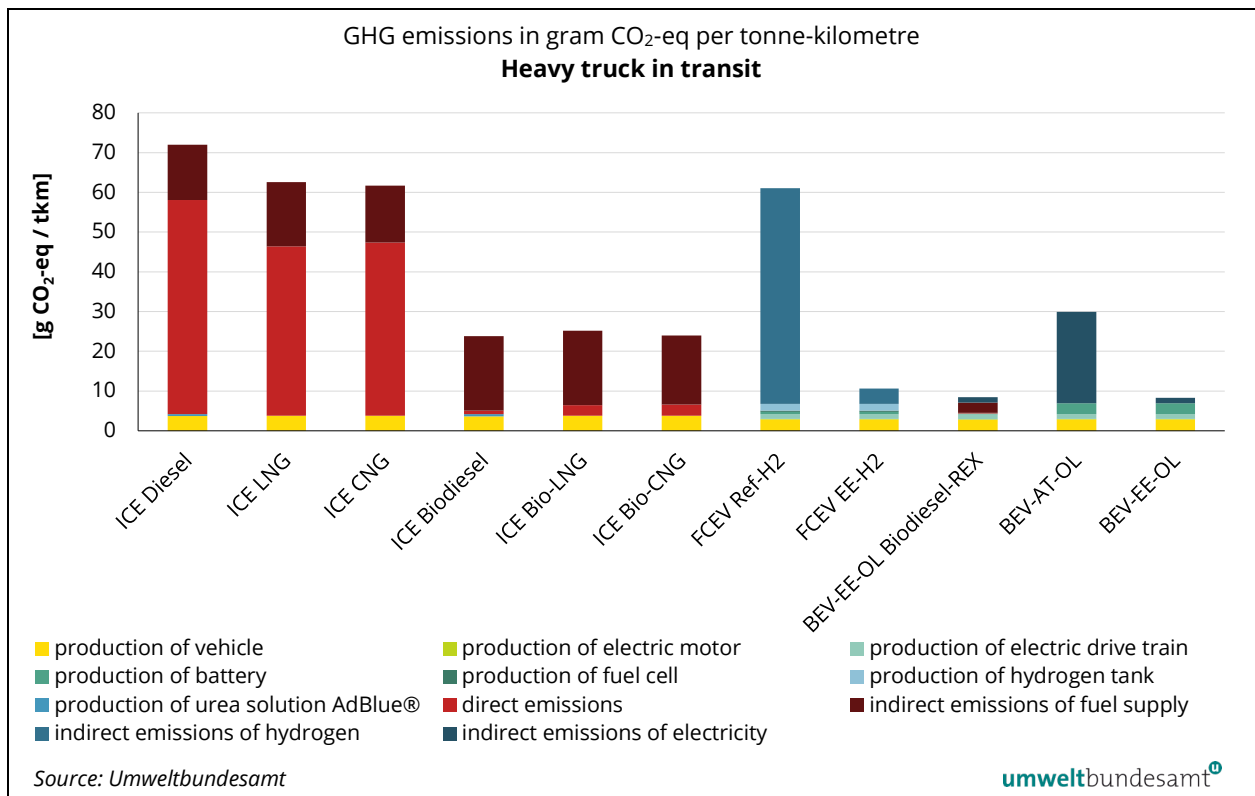


Figure C: Comparison of specific GHG emissions per passenger-kilometre, city bus

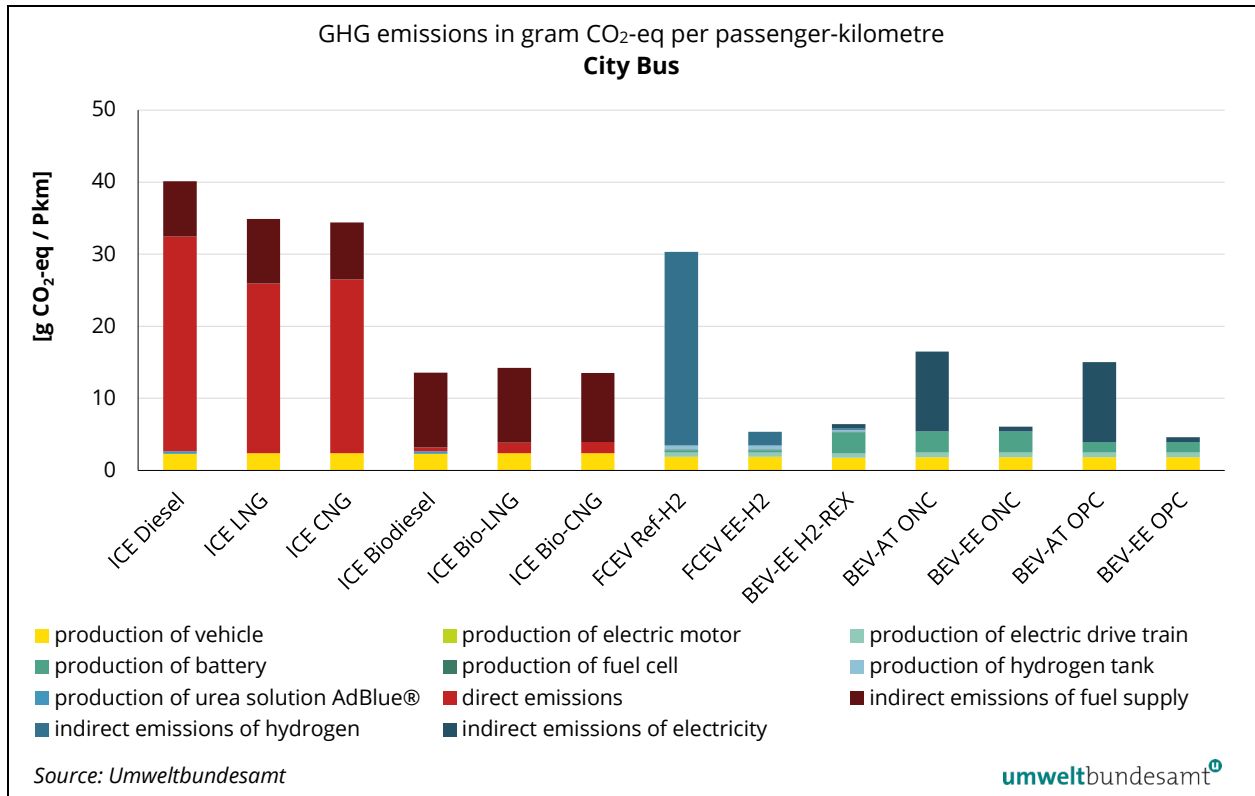
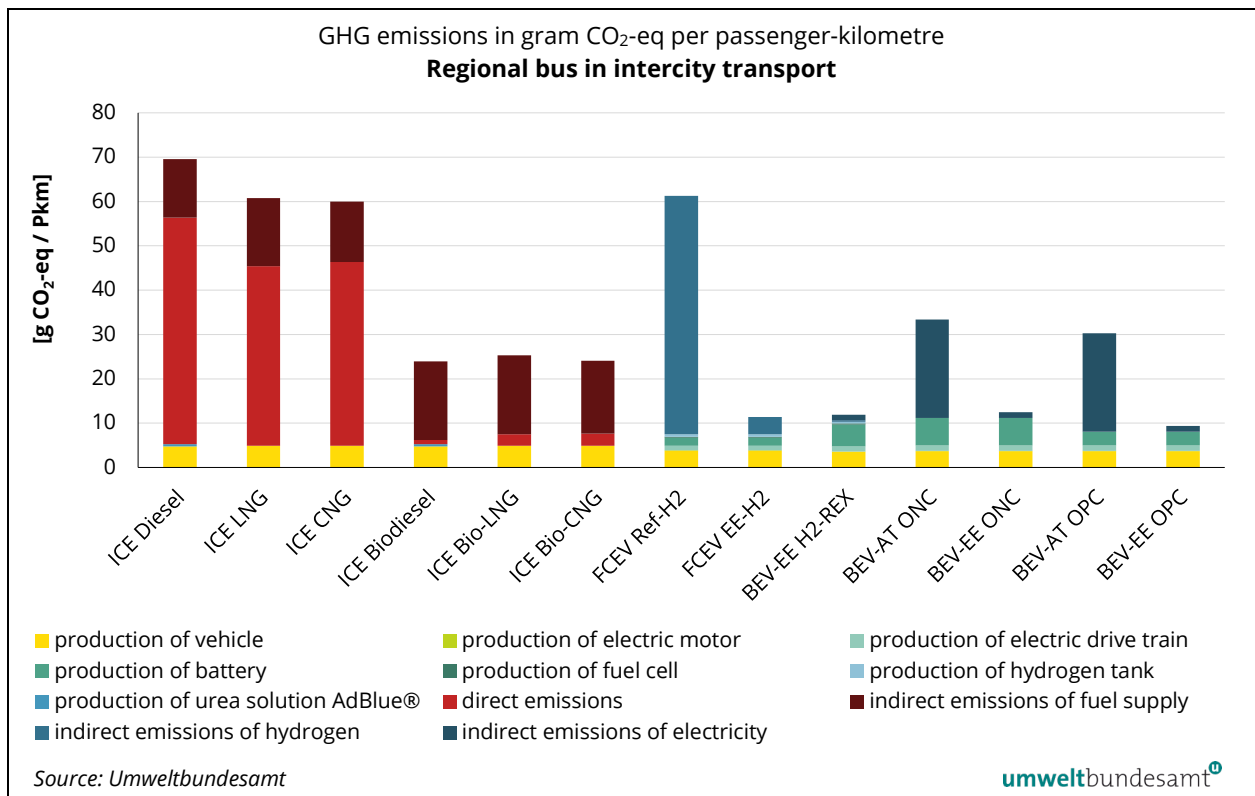


Figure D: Comparison of specific GHG emissions per passenger-kilometre, regional bus



Impressum

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

Diese Publikation erscheint ausschließlich in elektronischer Form auf <https://www.umweltbundesamt.at/>.

© Umweltbundesamt GmbH, Wien, 2022

Alle Rechte vorbehalten

ISBN 978-3-99004-625-8