



Bericht

Geschätzte Treibhausgasemissionen und Primärenergieverbrauch in der Lebenszyklusanalyse von Pkw-basierten Verkehrssystemen

Gerfried Jungmeier, Lorenza Canella, Johanna Pucker-Singer, Martin Beermann

Im Auftrag von:



Österreichischer Automobil-, Motorrad- und Touring Club



Fédération Internationale de l'Automobile



Allgemeiner Deutscher Automobil-Club

Graz, 12. September 2019 (Version 1.1)

Inhalt

Zusammenfassung	5
ABKÜRZUNGEN	8
Abbildungsverzeichnis	9
Tabellenverzeichnis	13
1. Einleitung	16
2. Zielsetzung	16
3. Methodik der Lebenszyklusanalyse (LCA)	17
3.1 Definition Lebenszyklusanalyse (LCA)	17
3.2 Systemgrenzen	19
3.3 Funktionelle Einheit.....	23
3.4 Umweltauswirkungen	24
3.4.1 Treibhausgasemissionen.....	25
3.4.2 CO ₂ -Emissionen durch Landnutzungsänderung, Biokraftstoffe und E-Fuels.....	25
3.4.3 Kumulierter Primärenergieaufwand.....	29
3.5 Vergleich mit anderen Methoden.....	29
3.5.1 Well-to-WheelAnalyse (WtW)	29
3.5.2 Methode gemäß der Erneuerbare-Energien-Richtlinie (RED)	30
3.6 Datenblätter	30
3.7 Stakeholder-Einbindung	33
4. Verkehrssysteme	34
4.1 Hauptmerkmale.....	34
4.2 Identifikation der wichtigsten Systeme.....	36
4.3 Ausgewählte Systeme.....	38
4.4 Schematische Darstellung der Prozesskette	40
4.4.1 Beschreibung.....	40
4.4.2 Beispiele.....	42
5. Datenbank	53
5.1 Datenstruktur	53
5.2 Zukünftige Entwicklungen	56
5.3 Vordergrunddaten	60
5.3.1 Fahrzeugspezifikation.....	60
5.3.2 Fossile Ressourcen	65
5.3.3 Biomasse-Ressourcen.....	66
5.3.4 Strommix	69
5.3.5 Mögliche zukünftige Entwicklungen	75

5.4	Hintergrunddaten	76
5.4.1	<i>Fahrzeugproduktion</i>	76
5.4.2	<i>Bereitstellung von Energieträgern für das Fahrzeug</i>	77
5.4.3	<i>Landnutzungsänderung zum Anbau von Rohstoffen für Biokraftstoffe</i>	81
6.	Ergebnisse	82
6.1	Einleitung	82
6.2	Verbrennerfahrzeug (ICEV) mit fossilem Kraftstoff (einschl. Beimischung von Biokraftstoffen)	83
6.3	Plug-in-Hybrid (PHEV)	86
6.4	Batterie-Elektrofahrzeug (BEV)	91
6.5	Wasserstoffbrennstoffzellen-Fahrzeug (HFCV)	95
6.6	Biokraftstoff-Verbrennerfahrzeug (ICEV)	98
6.7	E-Fuel-Verbrennerfahrzeuge (ICEV)	100
6.8	Systemvergleich für die EU-28.....	104
6.8.1	<i>Vergleich von Treibhausgasemissionen und Energiebedarf pro Kilometer</i>	105
6.8.2	<i>Vergleich der kumulierten Treibhausgasemissionen über die gesamte Lebensdauer</i> 109	
7.	Hauptkenntnisse und Schlussfolgerungen	115
8.	Referenzen	116
9.	Anhang I: Hintergrunddaten	119
9.1	LCA der Batterieproduktion	119
9.1.1	<i>Basisdaten</i>	119
9.1.2	<i>LCA-Modell für Fahrzeugbatterien</i>	120
9.1.3	<i>Schätzung der Treibhausgasemissionen und des Primärenergieaufwands</i>	124
9.1.4	<i>Vergleich mit anderen Studien</i>	128
9.1.5	<i>Wesentliche Einflüsse</i>	128
9.2	Wasserstofferzeugung	131
9.3	E-Fuel-Produktion	132
9.4	Biokraftstoff-Produktion	133
9.5	Energiebedarf und Emissionen von Pkw	136
9.5.1	<i>Einleitung</i>	136
9.5.2	<i>Das Simulationstool PHEM</i>	136
9.5.3	<i>Fahrzeugdaten in PHEM</i>	140
9.5.4	<i>Fahrzyklus</i>	142
9.5.5	<i>Emissionskennfelder in PHEM</i>	143
9.6	Fahrzeugproduktion	143
9.6.1	<i>Gewichtsschätzung von Fahrzeugen</i>	143
9.6.2	<i>Materialmix der Fahrzeuge</i>	153

9.6.3	<i>Energiebedarf in der Fahrzeugfertigung</i>	155
9.6.4	<i>Brennstoffzelle und Wasserstofftank</i>	155
9.7	Ladeinfrastruktur für Elektrofahrzeuge	158
10.	Anhang II: Vergleich der Treibhausgasemissionen der Stromerzeugung	160
10.1	Einleitung	160
10.2	Vergleich	161
10.2.1	<i>Zusammenfassung des Vergleichs aller Länder</i>	161
10.2.2	<i>Österreich</i>	163
10.2.3	<i>Deutschland</i>	164
10.2.4	<i>Schweiz</i>	165
10.2.5	<i>Referenzen</i>	170

Zusammenfassung

„International herrscht Einigkeit darüber, dass die Umweltauswirkungen von Verkehrssystemen nur auf der Grundlage der Lebenszyklusanalyse (LCA), von der Produktion über den Betrieb bis zum Lebensende der verschiedenen Anlagen, analysiert und verglichen werden können.“

Die Lebenszyklusanalyse ist eine Methode zur Schätzung der Stoff- und Energieströme eines Produktes (z. B. Transportsystem), um die Umweltauswirkungen über die gesamte Lebensdauer des Produktes, „von der Wiege bis zur Bahre“, zu analysieren.

Im Rahmen dieses Projektes werden die Umweltauswirkungen der verschiedenen Phasen im Lebenszyklus von Personenkraftwagen untersucht. Diese Phasen umfassen Rohstoffgewinnung, Produktion, Vertrieb, Produktnutzung, Wiederverwertung und Entsorgung (von der Wiege bis zur Bahre). Die Lebenszyklusanalyse ermöglicht den Vergleich unterschiedlicher Systeme, die über den gleichen Zeitraum die gleiche Transportleistung bieten, und identifiziert die Lebenszyklusphasen mit den stärksten Umweltauswirkungen.

Ziele des Projektes sind:

- Abschätzung, Beurteilung und Dokumentation der Treibhausgasemissionen und des kumulierten Primärenergieaufwands von Verkehrssystemen, die auf unterschiedlichen Pkw beruhen.
- Entwicklung eines Tools zum Beurteilen und Vergleichen der Umweltwirkungen verschiedener Pkw-basierter Verkehrssysteme („LCA-TOOL“)
- Anwendung der Methodik der Lebenszyklusanalyse (LCA)
- Bereitstellung von Standarddaten für die LCA und mögliche LCA-Berechnung mit eigenen Daten
- Einbindung der Stakeholder, um maximale Akzeptanz und einheitliche Eingaben zu gewährleisten

Die berechneten funktionellen Einheiten sind:

- Treibhausgasemissionen in g CO₂-Äq./km mit Angabe des prozentualen Anteils von CO₂, CH₄ und N₂O und der unterschiedlichen Lebenszyklusphasen, z. B. Produktion, Kraftstoff-/Energiezufuhr, Betrieb und Lebensende (EOL = End-of-Life)
- Kumulierter Primärenergieaufwand in kWh_{gesamt}/km mit Angabe des prozentualen Anteils fossiler und erneuerbarer Energie

Die Verkehrssysteme sind durch folgende Kriterien gekennzeichnet:

- Fahrzeugtyp: durchschnittlicher Pkw
- Antrieb: ICE – Verbrennungsmotor, BEV – Batterie-Elektrofahrzeug, HFC – Wasserstoffbrennstoffzelle und PHEV – Plug-in-Hybrid
- Kraftstoff/Energieträger: fossile Kraftstoffe (Diesel, Benzin, komprimiertes Erdgas – CNG); Biokraftstoffe (Biodiesel – FAME, hydriertes Pflanzenöl – HVO, Bioethanol - EtOH, Biomethan – CRG; E-Fuels – flüssige oder gasförmige Kraftstoffe, die mittels Strom aus einer Kohlenstoffquelle hergestellt werden); Strom und Wasserstoff aus unterschiedlichen Quellen
- Primärenergieart: Öl; Gas; Kohle; Kernenergie; Biomasse aus Forst- und Landwirtschaft sowie aus Rest- und Abfallstoffen; Windkraft; Wasserkraft; Solarenergie
- Stand der Technik: 2019, 2030 und 2050
- Länder: EU-28 – Europa, AT – Österreich, CH – Schweiz, DE – Deutschland, ES – Spanien, IT – Italien, UK – Vereinigtes Königreich, PL – Polen, PT – Portugal, AUS – Australien und CA – Kanada

Insgesamt wurden 64 Verkehrssysteme auf Basis eines durchschnittlichen Mittelklasse-Pkw ausgewählt und jeweils im Hinblick auf den Stand der Technik in den Jahren 2019, 2030 und 2050 analysiert. Die Verkehrssysteme wurden dabei in die folgenden sechs Gruppen unterteilt:

1. Verbrennerfahrzeug (ICEV) mit fossilem Kraftstoff (einschl. Beimischung von Biokraftstoffen): 7 Systeme
2. Plug-in-Hybrid mit fossilem Kraftstoff und Strom (PHEV): 22 Systeme
3. Batterie-Elektrofahrzeug (BEV): 14 Systeme
4. Wasserstoffbrennstoffzellen-Fahrzeug (HFCV): 4 Systeme
5. Biokraftstoff-Verbrennerfahrzeug (ICEV): 5 Systeme
6. E-Fuel-Verbrennerfahrzeug (ICEV): 12 Systeme

Die Haupteigenschaften der Bewertung der Umweltauswirkungen mittels LCA sind:

- Eine Bewertung der Umweltauswirkungen ist nur auf Grundlage der Lebenszyklusanalyse möglich.
- Der Anteil der Produktions- und der Betriebsphase an den gesamten kumulierten Umweltauswirkungen kann sich abhängig vom betrachteten System stark unterscheiden.
- Die Treibhausgasemissionen und der Primärenergieaufwand müssen getrennt beurteilt werden, da niedrige Treibhausgasemissionen aus der Nutzung erneuerbarer Energie nicht mit einer hohen Energieeffizienz einhergehen, weil fossile Kraftstoffe zwar oft energieeffizienter sind, aber hohe Treibhausgasemissionen aufweisen.
- Häufig korreliert der fossile Primärenergieaufwand mit den Treibhausgasemissionen, mit Ausnahme von Biokraftstoffen aufgrund der N₂O-Emissionen aus landwirtschaftlicher Biomasse (z. B. HVO aus Raps) und CH₄-Emissionen aus gasförmigen Kraftstoffen (z. B. CNG und CRG).
- Dabei müssen alle drei Arten von Treibhausgasemissionen – CO₂, CH₄ und N₂O – berücksichtigt werden, insbesondere CO₂ bei fossilen Kraftstoffen, CH₄ bei Erdgas, Kohle und Biomethan, sowie N₂O bei Biokraftstoffen aus Nutzpflanzen.
- Nebenprodukte ergeben sich insbesondere aus allen Biokraftstoffen, z. B. Tierfutter aus HVO, FAME und Bioethanol; Wärme aus FT-Diesel und CRG.
- Ein relevantes Nebenprodukt des Stroms für BEV und PHEV ist die Wärme aus Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen, die als Fernwärme genutzt wird/werden kann.
- Verkehrssysteme auf Basis von fossilen Kraftstoffen, z. B. Benzin, Diesel, CNG und E-Fuels unter Nutzung des aktuellen Strommixes, weisen die höchsten Treibhausgasemissionen auf.
- Verkehrssysteme, die (einen hohen Anteil an) erneuerbarer Energie nutzen, produzieren geringe Treibhausgasemissionen, wobei in manchen Fällen die Treibhausgasemissionen aus der Produktionsphase auffällig hoch sein können.
- Selbst auf lange Sicht kann es kein „treibhausgasneutrales“ Fahrzeug geben, aber Treibhausgasemissionen von weniger als 25 g CO₂-Äq./km sind unter Annahme weiterer technologischer Entwicklungen möglich.
- Der ausschlaggebendste Parameter für alle Systeme ist der Energieaufwand zum Betrieb des Fahrzeugs. Leichte und kleine Fahrzeuge, die zudem langsam fahren, können bei allen betrachteten Systemen ebenfalls zu einem niedrigen Energieverbrauch während des Fahrzeugbetriebs beitragen.

- Die Lebensdauer des Fahrzeugs und insbesondere der Wasserstoffbrennstoffzelle bzw. der Batterie kann einen wesentlichen Einfluss auf die Treibhausgasemissionen aus der Produktionsphase pro Kilometer haben.
- Eine zunehmende Nutzung erneuerbarer Energien im Straßenverkehr führt zu sinkenden Treibhausgasemissionen. Da die verfügbare zusätzliche erneuerbare Energie effizient genutzt werden sollte, wird auch ein niedrigerer Primärenergieaufwand bedeutsamer, weil z. B. ein BEV mit derselben Menge an erneuerbarer Energie eine größere Reichweite als ein HFCV oder ein E-Fuel-ICEV erzielen kann.

ABKÜRZUNGEN

BEV	Batterie-Elektrofahrzeug
CNG	Komprimiertes Erdgas
CO ₂	Kohlendioxid
CH ₄	Methan
CHP	Kraft-Wärme-Kopplung(sanlage)
CRG	Biomethan
dLUC	Direkte Landnutzungsänderung
E-Fuel	Synthetischer Kraftstoff, der mittels Strom (Power-to-Fuel) hergestellt wird
EtOH	(Bio-)Ethanol
FAME	Fettsäure-Methylester (Biodiesel)
FT-Diesel	Fischer-Tropsch-Diesel
GHG	Treibhausgasemissionen
H ₂	Wasserstoff
HEV	Hybrid
HFCV	Wasserstoffbrennstoffzellen-Fahrzeug
HFC	Wasserstoffbrennstoffzelle
HVO	Hydriertes Pflanzenöl
Hydro	Wasserkraft
ICE	Verbrennungsmotor
ICEV	Verbrennerfahrzeug
iLUC	Indirekte Landnutzungsänderung
LCA	Lebenszyklusanalyse
LUC	Landnutzungsänderung
N ₂ O	Stickoxid
PED	Primärenergieaufwand
PHEV	Plug-in-Hybrid
PV	Photovoltaik

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Schematische Darstellung der Lebenszyklusanalyse (LCA)	18
Abbildung 2: Rahmen der Lebenszyklusanalyse nach ISO 14040	19
Abbildung 3: Umfang der Lebenszyklusanalyse – Beispiel Batterie-Elektrofahrzeug	20
Abbildung 4: Die drei Phasen im Lebenszyklus eines Fahrzeugs – Produktion, Betrieb (einschließlich Kraftstoff-/Energieversorgung) und Lebensende für drei hypothetische Fahrzeugtypen A, B und C	21
Abbildung 5: Prozesskette für Fahrzeug mit Ottomotor	22
Abbildung 6: Prozesskette für Batterie-Elektrofahrzeug (Beispiel: Strom aus Wasserkraft)	23
Abbildung 7: Direkte Landnutzungsänderung (dLUC) und indirekte Landnutzungsänderung (iLUC)	26
Abbildung 8: Mögliche LUC-Effekte auf Treibhausgasemissionen von Biokraftstoffen (Vali H. et al., 2015)	28
<i>Abbildung 9: Konzept des Datenblattes</i>	32
<i>Abbildung 10: Übersicht zur Stakeholder-Einbindung</i>	34
Abbildung 11: Systematik der Verkehrssysteme	36
Abbildung 12: Allgemeines Schema der Prozesskette für das Verkehrssystem	42
Abbildung 13: Prozesskette „ICE_Benzin/Rohöl/2019/2030/2050/EU-28“ (#1)	44
Abbildung 14: Prozesskette für „ICE_FAME/Biomasse/2019/2030/2050/EU-28“ (#48)	45
Abbildung 15: Prozesskette für „ICE_Diesel B7/Rohöl&Biomasse/2019/2030/2050/EU-28“ (#5)	46
Abbildung 16: Prozesskette für „BEV_Strom/Wind/2019/2030/2050/EU-28“ (#32)	47
Abbildung 17: Prozesskette für „ICE_FAME/Biomasse/2019/2030/2050/EU-28“ (#30)	48
Abbildung 18: Prozesskette für „PHEV_Benzin&Strom/Rohöl&Strom/2019/2030/2050/EU-28“ (#8)	49
Abbildung 19: Prozesskette für „HFC_Wasserstoff/PV/2019/2030/2050/EU-28“ (#45)	50
Abbildung 20: Prozesskette für „ICE_CRG/Stroh&Holz/2019/2030/2050/EU-28“ (#52)	51
Abbildung 21: Prozesskette für „ICE_E-Fuel FT-Diesel/H2 Wind&CO2 Luft/2019/2030/2050/EU-28“ (#53)	52
Abbildung 22: Prozesskette für „ICE_E-Fuel FT-Diesel/Strom&CO2 Biomasse/2019/2030/2050/EU-28“ (#61)	53
Abbildung 23: Beispiele für Vordergrunddaten („Fahrzeug“, „Tankstelle und Ladestation“, „Verteilung“) und Hintergrunddaten („Material- und Komponentenproduktion“, „Demontage, Recycling und Energieerzeugung“)	55
Abbildung 24: Geschätzte Bereiche der Treibhausgasemissionen von Verbrennerfahrzeugen (ICEV) mit fossilem Kraftstoff (einschl. Beimischung von Biokraftstoffen) für 2019	85
Abbildung 25: Mögliche Entwicklung der geschätzten durchschnittlichen Treibhausgasemissionen von Verbrennerfahrzeugen (ICEV) mit fossilem Kraftstoff (einschl. Beimischung von Biokraftstoffen)	85
Abbildung 26: Geschätzte Bereiche der Treibhausgasemissionen von mit Benzin und Strom betriebenen Plug-in-Hybriden (PHEV)	89
Abbildung 27: Geschätzte Bereiche der Treibhausgasemissionen von mit Diesel und Strom betriebenen Plug-in-Hybriden (PHEV)	89
Abbildung 28: Mögliche Entwicklung der geschätzten durchschnittlichen Treibhausgasemissionen von mit Benzin und Strom betriebenen Plug-in-Hybriden (PHEV)	90

Abbildung 29: Mögliche Entwicklung der geschätzten durchschnittlichen Treibhausgasemissionen von mit Diesel und Strom betriebenen Plug-in-Hybriden (PHEV)	90
Abbildung 30: Geschätzte Bereiche der Treibhausgasemissionen von Batterie-Elektrofahrzeugen (BEV) für die betrachteten Länder	93
Abbildung 31: Geschätzte Bereiche der Treibhausgasemissionen von Batterie-Elektrofahrzeugen (BEV) bei erneuerbarem Strom	94
Abbildung 32: Mögliche Entwicklung der geschätzten durchschnittlichen Treibhausgasemissionen von Batterie-Elektrofahrzeugen (BEV) für die betrachteten Länder	94
Abbildung 33: Mögliche Entwicklung der geschätzten durchschnittlichen Treibhausgasemissionen von Batterie-Elektrofahrzeugen (BEV) bei erneuerbarem Strom	95
Abbildung 34: Geschätzte Bereiche der Treibhausgasemissionen von Wasserstoffbrennstoffzellen-Fahrzeugen (HFCV) für 2019	97
Abbildung 35: Mögliche Entwicklung der geschätzten durchschnittlichen Treibhausgasemissionen von Wasserstoffbrennstoffzellen-Fahrzeugen (HFCV)	97
Abbildung 36: Geschätzte Bereiche der Treibhausgasemissionen von Biokraftstoff-Verbrennerfahrzeugen (ICEV) für 2019	99
Abbildung 37: Mögliche Entwicklung der geschätzten durchschnittlichen Treibhausgasemissionen von Biokraftstoff-Verbrennerfahrzeugen (ICEV)	100
Abbildung 38: Geschätzte Bereiche der Treibhausgasemissionen von FT-Diesel als E-Fuel für Verbrennerfahrzeuge (ICEV) für 2019	102
Abbildung 39: Geschätzte Bereiche der Treibhausgasemissionen von CRG als E-Fuel für Biokraftstoff-Verbrennerfahrzeuge (ICEV) für 2019	103
Abbildung 40: Mögliche Entwicklung der geschätzten durchschnittlichen Treibhausgasemissionen von FT-Diesel als E-Fuel für Verbrennerfahrzeuge (ICEV)	103
Abbildung 41: Mögliche Entwicklung der geschätzten durchschnittlichen Treibhausgasemissionen von CRG als E-Fuel für Verbrennerfahrzeuge (ICEV)	104
Abbildung 42: Vergleich geschätzter Bereiche der Treibhausgasemissionen ausgewählter Verkehrssysteme in den EU-28 im Jahr 2019	107
Abbildung 43: Vergleich geschätzter Bereiche des kumulierten Primärenergieaufwands ausgewählter Verkehrssysteme in den EU-28 im Jahr 2019	107
Abbildung 44: Vergleich geschätzter Bereiche des kumulierten fossilen Primärenergieaufwands ausgewählter Verkehrssysteme in den EU-28 (2019)	108
Abbildung 45: Vergleich der möglichen Entwicklung der geschätzten durchschnittlichen Treibhausgasemissionen ausgewählter Verkehrssysteme in den EU-28	108
Abbildung 46: Vergleich der möglichen Entwicklung des geschätzten durchschnittlichen Primärenergieaufwands ausgewählter Verkehrssysteme in den EU-28	109
Abbildung 47: Geschätzte kumulierte Treibhausgasemissionen von Verbrennerfahrzeugen (ICEV), die flüssige fossile und biogene Kraftstoffe nutzen	112
Abbildung 48: Geschätzte kumulierte Treibhausgasemissionen von Verbrennerfahrzeugen (ICEV), die gasförmige fossile und biogene Kraftstoffe nutzen	112

Abbildung 49: Geschätzte kumulierte Treibhausgasemissionen von Wasserstoffbrennstoffzellen-Fahrzeugen (HFCV) und Batterie-Elektrofahrzeugen (BEV), die erneuerbaren Strom aus Wind, Wasser und PV nutzen, in den EU-28	113
Abbildung 50: Geschätzte kumulierte Treibhausgasemissionen von Verbrennerfahrzeugen (ICEV), die flüssige biogene Kraftstoffe und E-Fuels nutzen	113
Abbildung 51: Geschätzte kumulierte Treibhausgasemissionen von Verbrennerfahrzeugen (ICEV), die flüssige biogene Kraftstoffe und E-Fuels nutzen	114
Abbildung 52: Geschätzte kumulierte Treibhausgasemissionen von Batterie-Elektrofahrzeugen (BEV) und Wasserstoffbrennstoffzellen-Fahrzeugen (HFCV) sowie von ICE-Fahrzeugen mit FT-Diesel aus Biomasse und als E-Fuel	114
Abbildung 53: Geschätzte kumulierte Treibhausgasemissionen ausgewählter Verkehrssysteme	115
<i>Abbildung 54: Systemgrenzen von Fahrzeugbatterien</i>	121
<i>Abbildung 55: Hauptkomponenten des Fahrzeugbatteriesystems</i>	122
<i>Abbildung 56: Reichweite und geschätzte durchschnittliche Gewichtsverteilung dieser sieben Komponenten im Fahrzeugbatteriesystem (JOANNEUM RESEARCH 2019)</i>	123
<i>Abbildung 57: Materialverteilung in den sieben Komponenten des Fahrzeugbatteriesystems (JOANNEUM RESEARCH 2019)</i>	124
<i>Abbildung 58: Bereich der geschätzten Treibhausgasemissionen aus der Produktion von hochwertigen Materialien für Fahrzeugbatteriesysteme (JOANNEUM RESEARCH 2019)</i>	125
<i>Abbildung 59: Geschätzte durchschnittliche Treibhausgasemissionen der Fahrzeugbatteriesysteme (JOANNEUM RESEARCH 2019)</i>	127
<i>Abbildung 60: Geschätzter durchschnittlicher kumulierter Primärenergieaufwand der Fahrzeugbatteriesysteme (JOANNEUM RESEARCH 2019)</i>	127
<i>Abbildung 61: Einfluss der Batteriekapazität auf den geschätzten Bereich der Treibhausgasemissionen (JOANNEUM RESEARCH 2019)</i>	129
<i>Abbildung 62: Einfluss der Batterielebensdauer auf den geschätzten Bereich der Treibhausgasemissionen (JOANNEUM RESEARCH 2019)</i>	130
<i>Abbildung 63: Einfluss des länderspezifischen Strommixes für die Batterieproduktion auf den geschätzten Bereich der Treibhausgasemissionen (JOANNEUM RESEARCH 2019)</i>	130
<i>Abbildung 64: Einfluss des Energiebedarfs für die Batterieproduktion auf den geschätzten Bereich der Treibhausgasemissionen (JOANNEUM RESEARCH 2019)</i>	131
<i>Abbildung 65: PHEM-Simulationsschema (Hausberger et al. 2018)</i>	139
<i>Abbildung 66: Fahrzeugdaten in PHEM (Hausberger et al. 2018)</i>	140
<i>Abbildung 67: Zusammenfassung der Fahrzeugparameter (Hausberger et al. 2018)</i>	141
<i>Abbildung 68: RWC-Zyklus für die Simulation</i>	143
<i>Abbildung 69: Schema der Komponenten des Antriebssystems in einem PHEV</i>	145
<i>Abbildung 70: Modell zur Schätzung der Masse eines Elektromotors (Asynchronmaschine (ASM) und permanenterregte Synchronmaschine (PSM)) in Abhängigkeit von Leistung und Drehmoment</i>	147
<i>Abbildung 71: Vor- und Nachteile verschiedener Leichtbauwerkstoffe</i>	154
<i>Abbildung 72: Schema der Fertigungsprozesse für eine PEM-Brennstoffzelle (Evangelisti 2017)</i>	156

Abbildung 73: Masseanteile des PEM-Brennstoffzellensystems (Evangelisti 2017)	157
Abbildung 74: Anteil der Fertigung eines PEM-Brennstoffzellensystems an den Treibhausgasemissionen	157
Abbildung 75: Ladeverluste und Steckersysteme von On-Board- und Off-Board- Ladesystemen	158
Abbildung 76: Wirkungsgrade von DC-Ladestationen mit 50 kW ¹⁴	159
Abbildung 77: Vergleich der kumulierten Treibhausgasemissionen für den AT-Mix laut UBA und LCA-Tool	167
Abbildung 78: Vergleich der kumulierten Treibhausgasemissionen mittels DE-Mix laut UBA und LCA-Tool	168
Abbildung 79: Vergleich der kumulierten Treibhausgasemissionen mittels CH-Mix laut BFE und LCA-Tool	168
Abbildung 80: Vergleich der geschätzten Treibhausgasemissionen pro Kilometer anhand der unterschiedlichen Strommixe in AT	169
Abbildung 81: Vergleich der geschätzten Treibhausgasemissionen pro Kilometer anhand der unterschiedlichen Strommixe in DE	169
Abbildung 82: Vergleich der geschätzten Treibhausgasemissionen pro Kilometer anhand der unterschiedlichen Strommixe in CH	170

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Ausgewählte Verkehrssysteme mit Verbrennerfahrzeugen (ICEV) mit fossilem Kraftstoff (einschl. Beimischung von Biokraftstoffen)	38
Tabelle 2: Ausgewählte Verkehrssysteme mit Plug-in-Hybriden mit fossilem Kraftstoff und Strom (PHEV)	39
Tabelle 3: Ausgewählte Verkehrssysteme mit Batterie-Elektrofahrzeugen (BEV)	39
Tabelle 4: Ausgewählte Verkehrssysteme mit Wasserstoffbrennstoffzellen-Fahrzeugen (HFCV)	39
Tabelle 5: Ausgewählte Verkehrssysteme mit Biokraftstoff-Verbrennerfahrzeugen (ICEV)	40
Tabelle 6: Ausgewählte Verkehrssysteme mit E-Fuel-Verbrennerfahrzeugen (ICEV)	40
Tabelle 7: Identifizierte Hauptdaten zur Technologieentwicklung und -implementierung in Europa (EU-2018)	58
Tabelle 8: Vordergrunddaten für Fahrzeuge mit ICE, die fossile Kraftstoffe nutzen (für alle betrachteten Länder gleich) (JOANNEUM RESEARCH 2019)	62
Tabelle 9: Vordergrunddaten für Fahrzeuge mit ICE, die erneuerbare Kraftstoffe nutzen (für alle betrachteten Länder gleich) (JOANNEUM RESEARCH 2019)	63
Tabelle 10: Vordergrunddaten für PHEV, BEV und FCHV (für alle betrachteten Länder gleich) (JOANNEUM RESEARCH 2019)	64
Tabelle 11: Vordergrunddaten zu Batterieproduktion, -ladung und -ende (eigene Annahmen und Standort der Batterieproduktion nach Ajanovic et al. 2018)	65
Tabelle 12: Vordergrunddaten für den Anteil fossiler Ressourcen bei Öl und Gas (eigene Annahmen)	66
Tabelle 13: Vordergrunddaten für Landnutzungsänderung bei Biokraftstoffen (eigene Annahmen)	68
Tabelle 14: Vordergrunddaten für Biomassemix bei Biokraftstoffen (EUA 2018, UFOP 2018, ePURE 2018 und eigene Annahmen)	68
Tabelle 15: Vordergrunddaten für Strommixe 2019 (IEA 2019)	72
Tabelle 16: Vordergrunddaten für Strommixe 2030 (EU-2018)	73
Tabelle 17: Vordergrunddaten für Strommixe 2050 (EU-2018)	74
Tabelle 18: Vordergrunddaten für mögliche zukünftige Entwicklungen	76
Tabelle 19: Hintergrunddaten für den Materialmix von Fahrzeugen (ohne Batterie, Brennstoffzelle und ICE) (Grundlage: Hausberger et al. 2019 und JOANNEUM RESEARCH 2019)	77
Tabelle 20: Hintergrundinformationen zu Materialien und Energie für die Fahrzeugproduktion (JOANNEUM RESEARCH 2019 und GEMIS 2019)	77
Tabelle 21: Hintergrunddaten für Heizwerte fossiler und biogener Ressourcen (JOANNEUM RESEARCH 2019)	78
Tabelle 22: Hintergrunddaten für Heizwerte von Kraftstoffen (JOANNEUM RESEARCH 2019, vergleichbar mit EU 2018a)	79
Tabelle 23: Hintergrunddaten zur Tankstellenversorgung mit fossilen Kraftstoffen (JOANNEUM RESEARCH 2019)	79
Tabelle 24: Hintergrunddaten zur Tankstellenversorgung mit Biokraftstoffen (JOANNEUM RESEARCH 2019)	80
Tabelle 25: Hintergrunddaten zur Stromversorgung von Ladestationen (JOANNEUM RESEARCH 2019, Grundlage: Strommix wie in den Vordergrunddaten definiert)	80

Tabelle 26: Hintergrunddaten zur Tankstellenversorgung mit Wasserstoff (JOANNEUM RESEARCH 2019)	81
Tabelle 27: Hintergrunddaten zur Tankstellenversorgung mit E-Fuels (JOANNEUM RESEARCH 2019)	81
Tabelle 28: Hintergrunddaten zur direkten und indirekten Landnutzungsänderung (LUC) für Biomasse-Ressourcen (Grundlage: EU 2009, EU 2015)	82
Tabelle 29: Geschätzte Bereiche der Treibhausgasemissionen und des Primärenergieaufwands von Verbrennerfahrzeugen (ICEV) mit fossilem Kraftstoff (einschl. Beimischung von Biokraftstoffen)	84
Tabelle 30: Geschätzte Bereiche der Treibhausgasemissionen und des Primärenergieaufwands von mit Benzin und Strom betriebenen Plug-in-Hybriden (PHEV)	87
Tabelle 31: Geschätzte Bereiche der Treibhausgasemissionen und des Primärenergieaufwands von mit Diesel und Strom betriebenen Plug-in-Hybriden (PHEV)	88
Tabelle 32: Geschätzte Bereiche der Treibhausgasemissionen und des Primärenergieaufwands von Batterie-Elektrofahrzeugen (BEV) für die betrachteten Länder	92
Tabelle 33: Geschätzte Bereiche der Treibhausgasemissionen und des Primärenergieaufwands von Batterie-Elektrofahrzeugen (BEV) für erneuerbaren Strom	93
Tabelle 34: Geschätzte Bereiche der Treibhausgasemissionen und des Primärenergieaufwands von Wasserstoffbrennstoffzellen-Fahrzeugen (HFCV)	96
Tabelle 35: Geschätzte Bereiche der Treibhausgasemissionen und des Primärenergieaufwands von Biokraftstoff-Verbrennerfahrzeugen (ICEV)	99
Tabelle 36: Geschätzte Bereiche der Treibhausgasemissionen und des Primärenergieaufwands von FT-Diesel als E-Fuel für Verbrennerfahrzeuge (ICEV)	101
Tabelle 37: Geschätzte Bereiche der Treibhausgasemissionen und des Primärenergieaufwands von CRG als E-Fuel für Verbrennerfahrzeuge (ICEV)	102
Tabelle 38: Geschätzte Bereiche der Treibhausgasemissionen und des Primärenergieaufwands für die ausgewählten Verkehrssysteme	106
<i>Tabelle 39: Daten für die Wasserstoffherzeugung durch Elektrolyse und Erdgasdampfreformierung (JOANNEUM RESEARCH 2019, BioGrace 2015)</i>	131
<i>Tabelle 40: Daten für die CO₂-Abtrennung aus Abgas und Luft (JOANNEUM RESEARCH 2019)</i>	132
<i>Tabelle 41: Daten für die FT- und CRG-Produktion aus Biomasse, Wasserstoff and Kohlendioxid (JOANNEUM RESEARCH 2019)</i>	133
<i>Tabelle 42: Daten für die Pflanzenölproduktion (JOANNEUM RESEARCH 2019, BioGrace 2015)</i>	134
<i>Tabelle 43: Daten für die FAME (Biodiesel)-Produktion (JOANNEUM RESEARCH 2019, BioGrace 2015)</i>	134
<i>Tabelle 44: Daten für die HVO-Produktion (JOANNEUM RESEARCH 2019, BioGrace 2015)</i>	135
<i>Tabelle 45: Daten für die Bioethanol-Produktion (JOANNEUM RESEARCH 2019, BioGrace 2015)</i>	135
<i>Tabelle 46: Daten für die Biogasproduktion (JOANNEUM RESEARCH 2019, BioGrace 2015)</i>	135
<i>Tabelle 47: Eigenschaften der in der PHEM-Simulation verwendeten Kraftstoffe (Hausberger et al. 2018)</i>	139
<i>Tabelle 48: Schätzung der Leistung für Nebenaggregate (Hausberger et al 2018)</i>	142
<i>Tabelle 49: Schätzung der Fahrwerksmasse des Basisfahrzeugs (Hausberger et al. 2018)</i>	144

<i>Tabelle 50: Parameter und Faktoren für die Schätzung der Masse der verschiedenen Komponenten des PHEV (Hausberger et al. 2018)</i>	146
<i>Tabelle 51: Schätzung der Masse eines PHEV (Hausberger et al. 2018)</i>	148
<i>Tabelle 52: Schätzung von Parametern für verschiedene Komponenten (FCEV, HEV, BEV) (Hausberger et al. 2018)</i>	149
<i>Tabelle 53: Schätzung von Parametern für verschiedene Komponenten (PHEV, CNG, Benzin- und Diesel-ICE) (Hausberger et al. 2018)</i>	150
<i>Tabelle 54: Geschätzte Massen von Fahrzeugkomponenten (BEV, HEV und FCHV) (Hausberger et al. 2018)</i>	151
<i>Tabelle 55: Geschätzte Massen von Fahrzeugkomponenten (PHEV, CNG, Otto- und Diesel-ICE) (Hausberger et al. 2018)</i>	152
<i>Tabelle 56: Leistung und Masse der verschiedenen Fahrzeug- und Antriebssysteme (Hausberger et al. 2018)</i>	153
<i>Tabelle 57: Zusammenfassung der Parameter und Vergleich</i>	162

1. Einleitung

Zunächst ein Zitat zur Methodik von Umweltbewertungen:

„International herrscht Einigkeit darüber, dass die Umweltauswirkungen von Verkehrssystemen nur auf der Grundlage der Lebenszyklusanalyse (LCA), von der Produktion über den Betrieb bis zum Lebensende der verschiedenen Anlagen, analysiert und verglichen werden können.“

2. Zielsetzung

Ziele des Projektes sind:

- Abschätzung, Beurteilung und Dokumentation der Treibhausgasemissionen und des kumulierten Primärenergieaufwands von Verkehrssystemen, die auf unterschiedlichen Pkw beruhen.
- Entwicklung eines Tools zum Beurteilen und Vergleichen der Umweltwirkungen verschiedener Pkw-basierter Verkehrssysteme („LCA-Tool“)
- Anwendung der Methodik der Lebenszyklusanalyse (LCA)
- Berücksichtigung unterschiedlicher Umweltauswirkungen, z. B. Treibhausgasemissionen, Primärenergieaufwand
- Bereitstellung von Standarddaten für die LCA und mögliche LCA-Berechnung mit eigenen Daten
- Einbindung der Stakeholder, um maximale Akzeptanz und einheitliche Eingaben zu gewährleisten
- Berücksichtigung eines breiten Spektrums diverser aktueller und zukünftiger Verkehrssysteme (fossile und biogene Kraftstoffe, Wasserstoff, Strom)
- Darstellung von Umweltauswirkungen in einem kompakten Format (z. B. Tabellen, Abbildungen in Datenblättern) und Hervorhebung der wichtigsten Einflüsse
- Präsentation und Diskussion der Ergebnisse sowie Identifikation der Haupteinflüsse

3. Methodik der Lebenszyklusanalyse (LCA)

3.1 Definition Lebenszyklusanalyse (LCA)

Die Lebenszyklusanalyse ist eine Methode zur Schätzung der Stoff- und Energieströme eines Produktes (z. B. Transportsystem), um die Umweltauswirkungen über die gesamte Lebensdauer des Produktes, „von der Wiege bis zur Bahre“, zu analysieren.

Hierbei werden die Umweltauswirkungen der verschiedenen Phasen im Lebenszyklus von Personenkraftwagen untersucht. Diese Phasen umfassen Rohstoffgewinnung, Produktion, Vertrieb, Produktnutzung, Wiederverwertung und Entsorgung (von der Wiege bis zur Bahre) (Abbildung 1). Die Lebenszyklusanalyse ermöglicht den Vergleich unterschiedlicher Systeme, die über den gleichen Zeitraum die gleiche Transportleistung bieten, und identifiziert die Lebenszyklusphasen mit den stärksten Umweltauswirkungen.

Das wichtigste Wort der LCA-Definition lautet „Schätzung“, d.h. bei allen aus der LCA abgeleiteten Umweltauswirkungen handelt es sich um Schätzungen, da es nicht möglich ist, alle Umwelteinflüsse im Lebenszyklus eines Verkehrssystems vollständig zu identifizieren. Aufgrund der starken Entwicklung der LCA und ihrer Datenbanken in den letzten 15 Jahren lassen sich jedoch die wichtigsten Einflüsse auf die Treibhausgasemissionen und den Primärenergieaufwand unterschiedlicher Verkehrssysteme identifizieren und berechnen.

Um der LCA-Definition Rechnung zu tragen, sind alle Ergebnisse als Bereiche angegeben; beim Vergleich unterschiedlicher Verkehrssysteme ist nur relevant, ob sich die Bereiche stark unterscheiden. Teilüberlappungen von Bereichen zwischen zwei Systemen bedeuten, dass sich die Systeme hinsichtlich Treibhausgasemissionen und Primärenergieaufwand nicht erheblich unterscheiden.

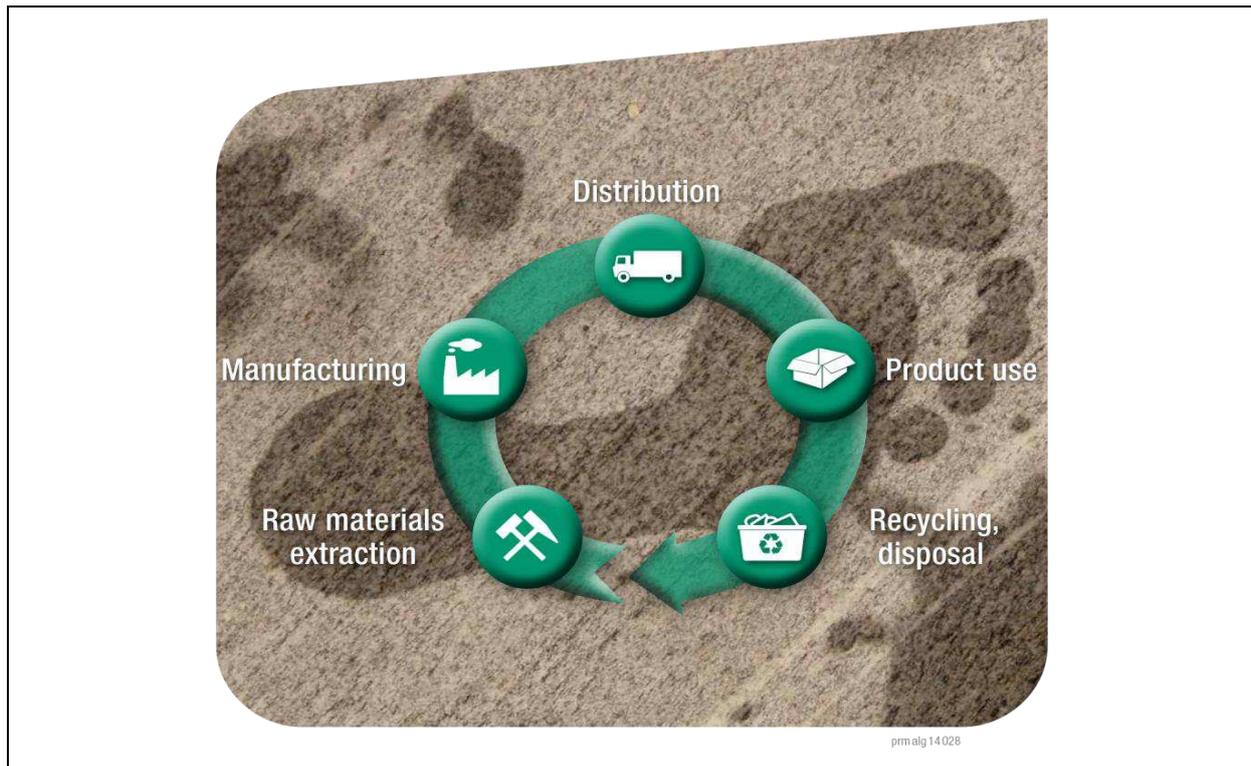


Abbildung 1: Schematische Darstellung der Lebenszyklusanalyse (LCA)

Gemäß ISO 14040 besteht eine LCA aus den folgenden vier Phasen, die während der gesamten Anwendung der LCA-Methodik eng miteinander verknüpft sind (Abbildung 2):

- Festlegung der Ziele und des Untersuchungsrahmens,
- Sachbilanz,
- Wirkungsabschätzung und
- Auswertung und Dokumentation.

Die Sachbilanz umfasst die Erstellung einer Masse- und Energiebilanz über die gesamte Prozesskette zur Berechnung des physikalischen (Primär-)Energieaufwands und der physikalischen Emissionen jedes einzelnen Treibhausgases.

Bei der Wirkungsabschätzung werden die einzelnen Energieeinträge und Emissionen mit dem kumulierten Primärenergieaufwand und den Erderwärmungseffekten vereinigt, indem die Erderwärmungspotenziale auf die einzelnen Treibhausgasemissionen angewandt werden.

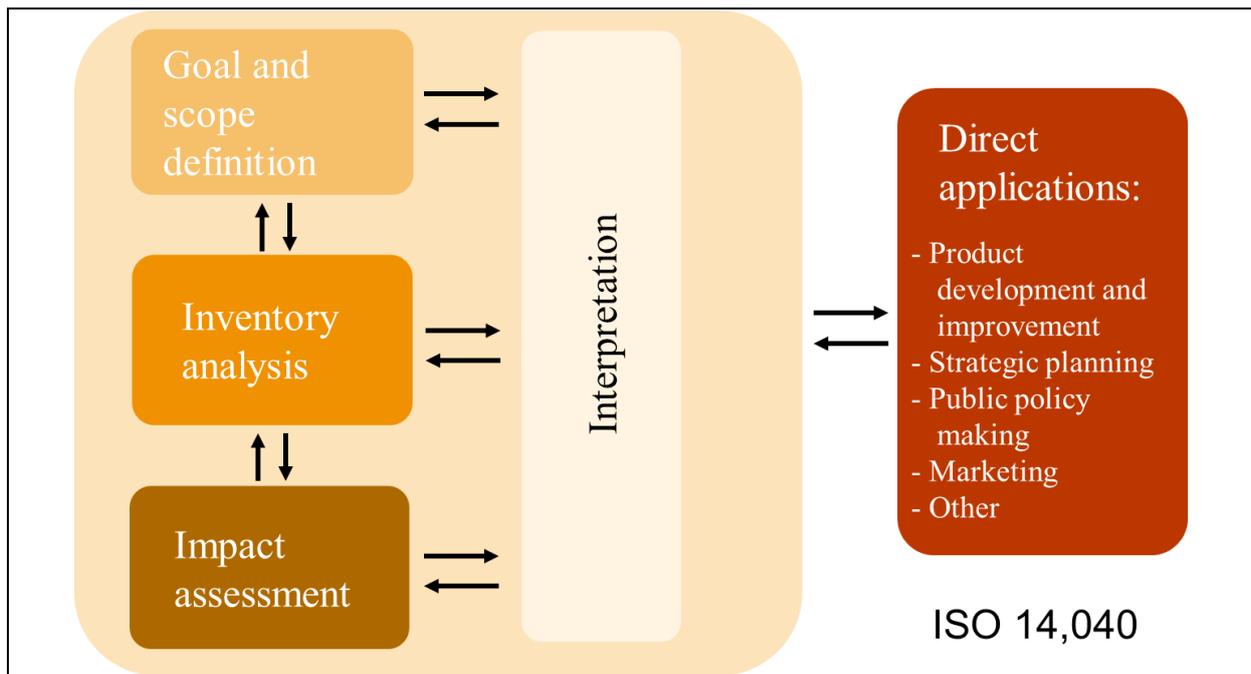


Abbildung 2: Rahmen der Lebenszyklusanalyse nach ISO 14040

3.2 Systemgrenzen

Zur Bewertung einer Transportleistung müssen alle Prozesse von der Rohstoff- und Ressourcengewinnung bis zum Fahrzeug, das die Transportleistung erbringt, berücksichtigt werden. Die Elemente und Systemgrenzen der LCA des Fahrzeugs beinhalten alle technischen Systeme, die Primärenergie und Materialressourcen nutzen und umwandeln, um die Transportleistung zu erbringen, und zu Umweltauswirkungen beitragen.

Abbildung 3 zeigt vereinfacht die Prozesskette für ein Batterie-Elektrofahrzeug, einschließlich Produktions-, Betriebs- und Lebensendphase des Systems:

- Die Produktionsphase beinhaltet die Herstellung des Fahrzeugs und der Batterie¹.
- Zur Betriebsphase gehören die Transportleistung, d.h. Fahren des Fahrzeugs, die Lade- und Tankinfrastruktur, das Stromnetz und die Stromerzeugung. Sie endet mit der Gewinnung der Primärenergie in der Natur.
- Zur Lebensendphase gehören die Fahrzeug-Demontageprozesse und das Sortieren der Materialien für Wiederverwendung, Recycling und Energieerzeugung.

¹ Auch die Ersatzteile werden bei der Produktionsphase berücksichtigt, obwohl sie sich kaum auswirken.

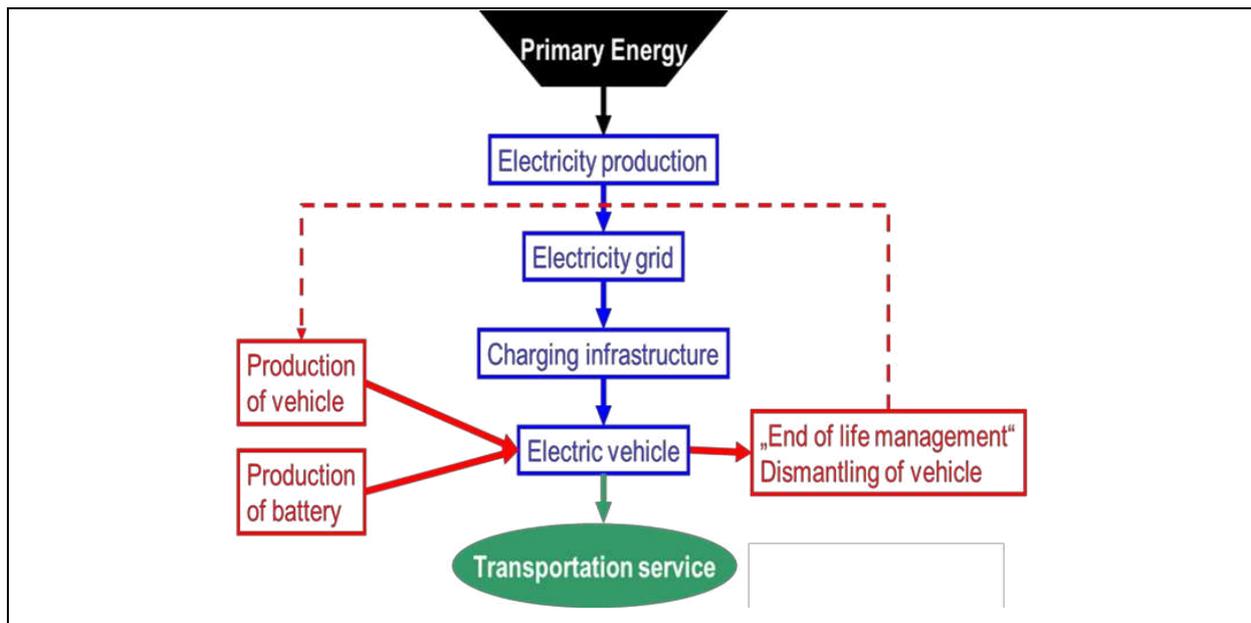


Abbildung 3: Umfang der Lebenszyklusanalyse – Beispiel Batterie-Elektrofahrzeug

Die Lebenszyklusanalyse der drei Phasen im Lebenszyklus eines Fahrzeugs – Produktion, Betrieb (einschließlich Kraftstoff/Energieversorgung) und Lebensende – kumuliert die Umweltauswirkungen über die gesamte Lebensdauer. Abbildung 4 zeigt dies für drei hypothetische Fahrzeugtypen. Die kumulativen Effekte über die gesamte Lebensdauer werden dann auf die in der Betriebsphase bereitgestellte Fahrleistung (z. B. 150.000 km) verteilt, um die spezifischen Wirkungen pro gefahrenem Kilometer (z. B. g CO₂-Äq./km) zu erhalten.

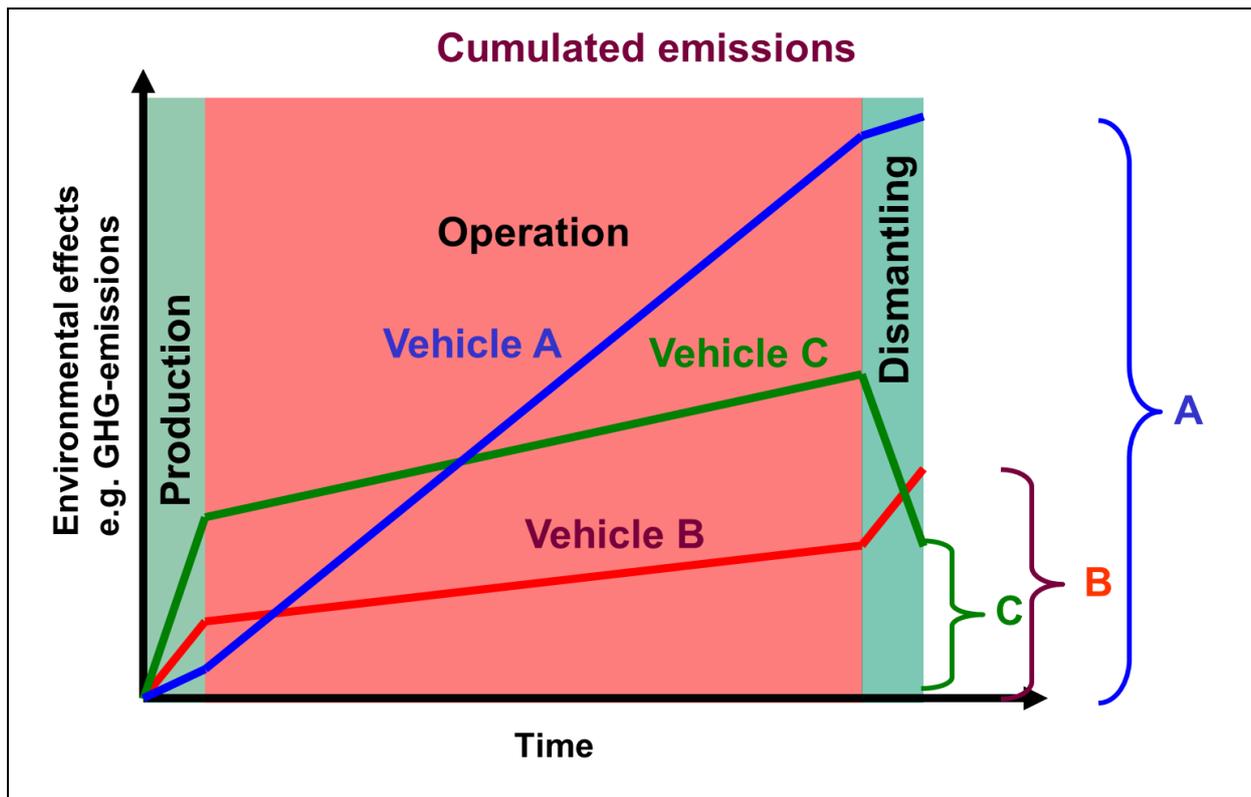


Abbildung 4: Die drei Phasen im Lebenszyklus eines Fahrzeugs – Produktion, Betrieb (einschließlich Kraftstoff-/Energieversorgung) und Lebensende für drei hypothetische Fahrzeugtypen A, B und C

Alle Treibhausgasemissionen und energierelevanten Prozesse zur Bereitstellung für die Transportleistung mit einem Pkw werden in der Prozesskette berücksichtigt, in die mögliche Nebenprodukte, z. B. Tierfutter aus der FAME-Produktion und Fernwärme aus der Stromerzeugung, mit ihren Effekten der Substitution anderer Produkte und Leistungen ebenfalls einfließen.

Als Beispiele zeigen Abbildung 5 die Prozesskette für ein Fahrzeug mit Ottomotor und Abbildung 6 die Prozesskette für ein Batterie-Elektrofahrzeug (Näheres zu den Prozessketten siehe Kapitel 4.4).

Für die Sachbilanz der LCA (siehe Abbildung 2) werden alle physikalischen Masse- und Energieflüsse, z. B. CO₂, N₂O und Strom, der Prozessketten analysiert oder geschätzt. Bei der Folgenabschätzung werden die Ergebnisse der Sachbilanz der Prozessketten für die verschiedenen Auswirkungskategorien beurteilt, z. B. werden die einzelnen Treibhausgasemissionen unter Berücksichtigung des Erderwärmungspotenzials der

unterschiedlichen Gase zum Erderwärmungspotenzial der unterschiedlichen Gase in CO₂-Äquivalenten addiert (siehe auch Kapitel 3.4).

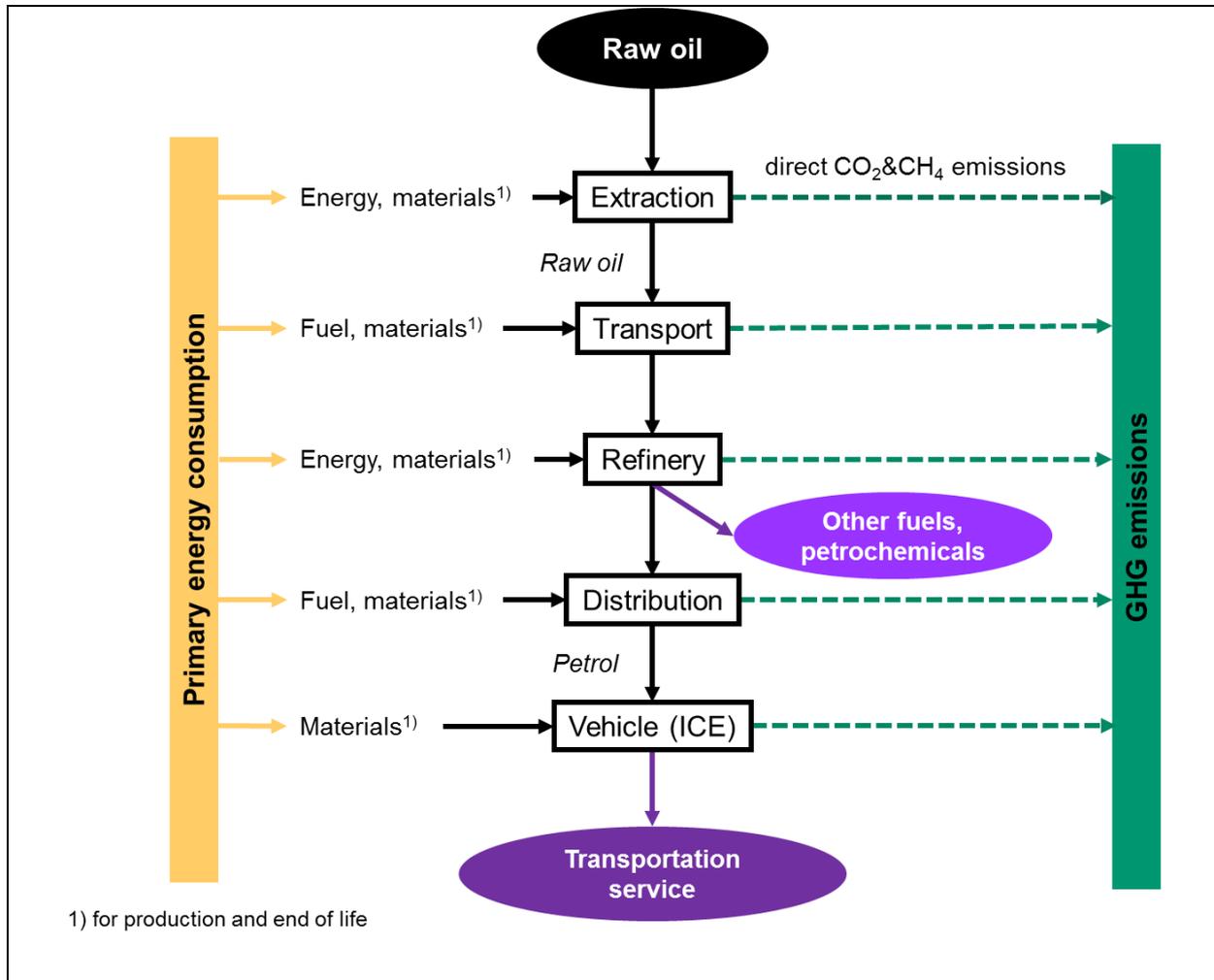


Abbildung 5: Prozesskette für Fahrzeug mit Ottomotor

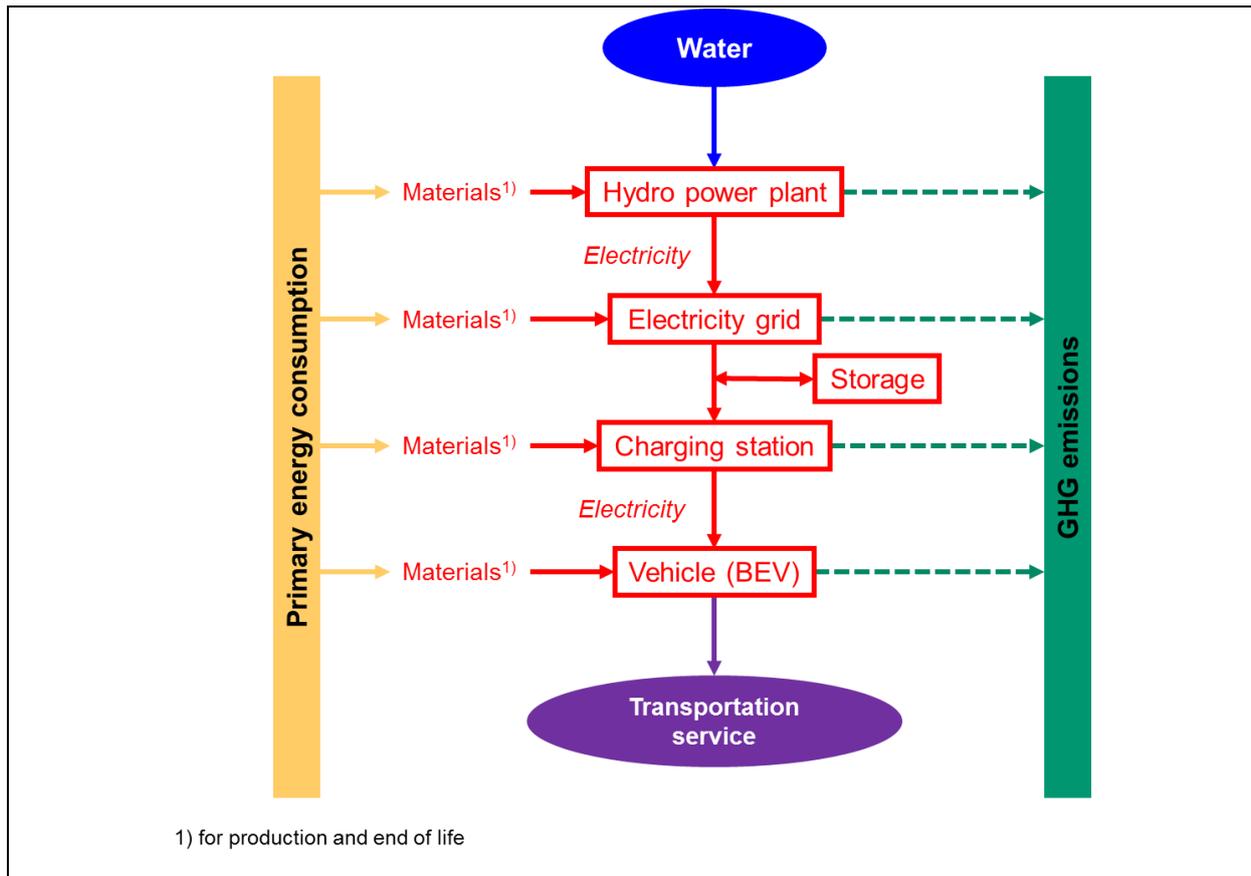


Abbildung 6: Prozesskette für Batterie-Elektrofahrzeug (Beispiel: Strom aus Wasserkraft)

Je nach Antrieb und Energieträger unterscheiden sich die verschiedenen Verkehrssysteme hinsichtlich Treibhausgasemissionen und kumuliertem Primärenergieaufwand. Diese Unterschiede treten an unterschiedlichen Orten, in unterschiedlichen Phasen und zu unterschiedlichen Zeiten im Lebenszyklus auf. Beispielsweise sind bei einem Fahrzeug mit Dieselmotor die CO₂-Emissionen während des Fahrzeugbetriebs am höchsten, während bei einem Biodieselfahrzeug die höchsten N₂O-Emissionen durch die Stickstoffdüngung beim Rohstoffanbau in der Landwirtschaft anfallen und sich bei einem Batterie-Elektrofahrzeug, das erneuerbaren Strom nutzt, derzeit die höchsten CO₂-Emissionen aus der Batterieproduktion in einem asiatischen Land ergeben.

3.3 Funktionelle Einheit

In der LCA werden die kumulativen Umweltauswirkungen über die Lebensdauer der funktionellen Einheit, d.h. der durch ein System bereitgestellten Leistung, zugeordnet. Bei der vorliegenden Analyse stellen die betrachteten Verkehrssysteme eine Transportleistung mit

Pkw bereit. Das heißt: Die kumulativen Umweltauswirkungen werden der funktionellen Einheit „1 km Fahrt mit einem Pkw“ zugeordnet. Diese funktionelle Einheit dient auch zum Vergleich der unterschiedlichen Verkehrssysteme.

Die berechneten funktionellen Einheiten sind:

- Treibhausgasemissionen in g CO₂-Äq./km mit Angabe des prozentualen Anteils von CO₂, CH₄ und N₂O und der unterschiedlichen Lebenszyklusphasen, z. B. Produktion, Kraftstoff-/Energiezufuhr, Betrieb und Lebensende.
- Kumulierter Primärenergieaufwand in kWh_{gesamt}/km mit Angabe des prozentualen Anteils fossiler und erneuerbarer Energie

Die funktionellen Einheiten sind wie folgt untergliedert:

- Kraftstoff/Energieversorgung
- Produktion
- Betrieb
- Lebensende und
- die verschiedenen Hauptprozessschritte sowie etwaige Gutschriften für Nebenprodukte.

Die jeweils möglichen Reichweiten von Verbrenner-, Batterie-Elektro- und Brennstoffzellen-Fahrzeugen sind in dieser funktionellen Einheit nicht berücksichtigt.

3.4 Umweltauswirkungen

Anhand der Sachbilanzdaten werden zwei Auswirkungskategorien beurteilt:

1. Erderwärmung und
2. gesamter kumulierter Primärenergieaufwand.

Zusätzlich werden die wichtigsten Aspekte der Landnutzungsänderung zur Rohstoffherzeugung für Biokraftstoffe hinsichtlich Treibhausgasemissionen beschrieben. Sonstige Umweltauswirkungen, wie Luftverschmutzung durch NO_x-, SO₂- und Feinstaubemissionen und deren Folgeschäden, wie etwa Versauerung, Ozonbildung und Humantoxizität, werden nicht berücksichtigt.

3.4.1 Treibhausgasemissionen

Die Treibhausgasemissionen – Kohlendioxid (CO₂), Methan (CH₄) und Stickstoffmonoxid (N₂O) – werden berücksichtigt.

Als Maß für den Treibhauseffekt dieser Gase dient das Erderwärmungspotenzial (GWP). Es gibt den Anteil der verschiedenen Gase an der möglichen Erderwärmung an und wird in CO₂-Äquivalenten ausgedrückt. Der Begriff Erderwärmungspotenzial wurde eingeführt, um den Anteil der verschiedenen Gase an der Erderwärmung zu vergleichen. Der Erderwärmungseffekt eines Kilogramms Gas wird als Mehrfaches („Äquivalenzfaktor“) des Effektes eines Kilogramms Kohlendioxid ausgedrückt. Mit den Äquivalenzfaktoren wird der Betrag der Gase als Betrag der CO₂-Äquivalente (CO₂-Äq) (Weltklimarat IPCC 2019) berechnet:

- 1 kg CO₂ = 1 kg CO₂-Äq.
- 1 kg CH₄ = 34 kg CO₂-Äq.
- 1 kg N₂O = 298 kg CO₂-Äq.

3.4.2 CO₂-Emissionen durch Landnutzungsänderung, Biokraftstoffe und E-Fuels

Die biogene CO₂-Emission der Verbrennung von Biokraftstoffen ist rechnerisch gleich Null, da dieselbe Menge an CO₂ während des Biomasseanbaus durch Fotosynthese aus der Atmosphäre aufgenommen wurde. Hierbei wird von einem nachhaltigen Anbau der Biomasse ausgegangen.

Dieses Berechnungssystem für biogenes CO₂ findet auch im Berechnungssystem nach den IPCC-Richtlinien für nationale Treibhausgasinventare im Energiesektor Anwendung. Änderungen und Dynamiken der Kohlenstoffbestände, z. B. des in Pflanzen, Abfall und Erde gespeicherten Kohlenstoffs, in der Land- und Forstwirtschaft werden in den CO₂-Emissionen oder der CO₂-Aufnahme aufgrund von Landnutzungsänderungen (LUC) für Biomasse zur Herstellung von Biokraftstoffen berücksichtigt.

Für die Analyse von CO₂-Effekten durch Landnutzungsänderung sind zwei verschiedene Arten von LUC relevant (Abbildung 7):

- Direkte Landnutzungsänderung (dLUC):
- Indirekte Landnutzungsänderung (iLUC):

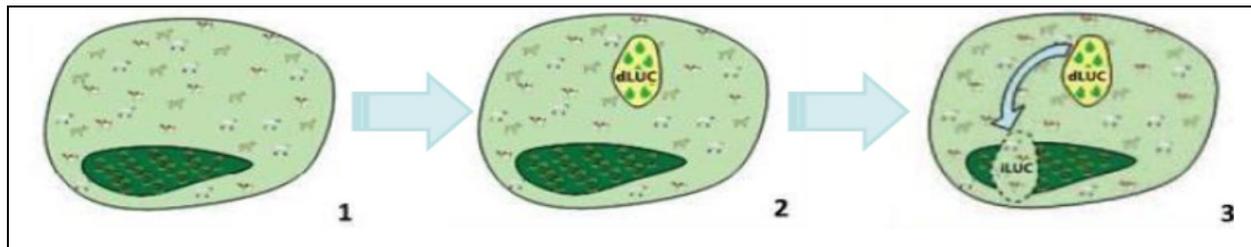


Abbildung 7: Direkte Landnutzungsänderung (dLUC) und indirekte Landnutzungsänderung (iLUC)

Eine direkte Landnutzungsänderung (dLUC) liegt vor, wenn diese zum Anbau von Energiepflanzen erfolgt, z. B. Grünland in Ackerland umgewandelt wird. Dabei lassen sich direkte Auswirkungen berechnen, z. B. die Veränderung von Kohlenstoffbeständen anhand der Differenz der Kohlenstoffbestände zwischen Grünland und Ackerland pro Hektar. Dieser einmalig auftretende Anfangseffekt ist der auf dem Ackerland angebauten Biomasse, z. B. für Biokraftstoffe, zuzuordnen.

Eine indirekte Landnutzungsänderung (iLUC) liegt vor, wenn auf bereits vorhandenem Ackerland, das zuvor für andere Produkte genutzt wurde, nun Energiepflanzen angebaut werden. Die anhaltende Nachfrage nach diesen Produkten führt zu zusätzlichem Landbedarf und bewirkt eine Landnutzungsänderung von globalem Ausmaß, z. B. die Umwandlung von Naturwäldern in landwirtschaftliche Nutzflächen. Indirekte Auswirkungen lassen sich nach ihrer Lokalisierung berechnen, was auf weltweiter Ebene schwierig ist. Die Berechnung dieses Anfangseffektes beruht auf der Differenz des Kohlenstoffbestands zwischen Wald und landwirtschaftlicher Nutzfläche. Auf physikalischer Ebene ist es aber nicht möglich, diese indirekten Auswirkungen direkt einer spezifischen Nutzpflanze, z. B. für Biokraftstoffe oder zusätzliches Tierfutter, zuzuordnen. Die indirekten Auswirkungen werden mittels ökonomischer Modelle und Methoden berechnet. Diese Modelle ergeben weite Bereiche für mögliche iLUC-Effekte des Biomasseanbaus für Biokraftstoffe.

Für die Berechnung der Treibhausgasemissionen aufgrund von Landnutzungsänderung wendet die Europäische Kommission das GLOBIOM-Modell – Global Biosphere Management Model an (Vali H. et al., 2015; <http://www.globiom.org/>). Das Global Biosphere Management Model (GLOBIOM) des IIASA (Internationales Institut für angewandte Systemanalyse) dient zur Analyse des Landnutzungswettbewerbs zwischen Landwirtschaft, Forstwirtschaft und Bioenergie, bei denen es sich um die wichtigsten landnutzungsabhängigen

Produktionssektoren handelt. Das Modell als solches ermöglicht Wissenschaftlern und politischen Entscheidungsträgern eine weltweite Beurteilung der rationalen Produktion von Lebensmitteln, Forstfasern und Bioenergie – die alle zum Wohlergehen des Menschen beitragen. Im GLOBIOM ist keine Unterscheidung zwischen iLUC und dLUC möglich, da iLUC keinen bestimmten landwirtschaftlichen Aktivitäten zugeordnet werden kann.

Abbildung 8 zeigt beispielhaft einige Ergebnisse möglicher LUC-Effekte von Biokraftstoffen im GLOBIOM-Modell. Die höchsten möglichen Treibhausgasemissionen der LUC ergeben sich rechnerisch für FAME aus Palmöl mit etwa 231 g CO₂-Äq/MJ, aus Sojaöl mit etwa 150 g CO₂-Äq/MJ und aus Rapsöl mit etwa 65 g CO₂-Äq/MJ. Die möglichen Treibhausgasemissionen von Bioethanol aus Mais, Weizen und Zuckerrüben aufgrund von LUC-Effekten sind mit 14 bis 34 g CO₂-Äq/MJ deutlich niedriger.

In der vorliegenden Berechnung sind die möglichen dLUC- und iLUC-Effekte auf die Treibhausgasemissionen berücksichtigt; die Hauptdaten sind in Tabelle 28 im Kapitel 5.4.3 aufgeführt.

Allerdings enthalten die LCA-Ergebnisse dieses Berichts und des Tools nur die berechneten möglichen CO₂-Effekte der dLUC. Der mögliche CO₂-Effekt der iLUC ist in Form von Hintergrunddaten rein zur Information angegeben.

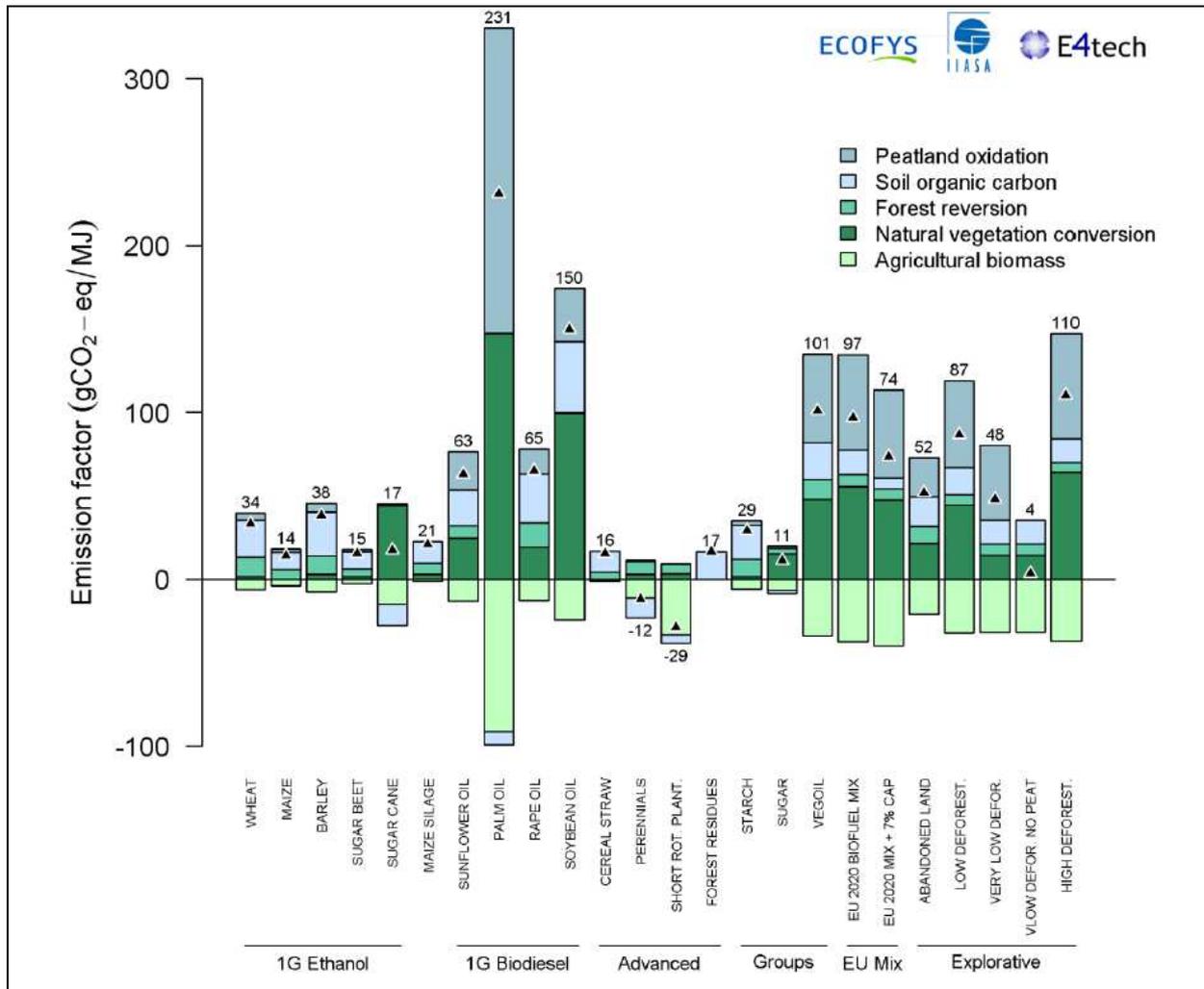


Abbildung 8: Mögliche LUC-Effekte auf Treibhausgasemissionen von Biokraftstoffen (Vali H. et al., 2015)

Die Berechnung der CO₂-Emissionen aus der Verbrennung von E-Fuels ergibt ebenfalls Null. Stammt das CO₂ aus der Verbrennung von Biomasse, entspricht sein Wert dem oben für Biokraftstoffe beschriebenen. Wird CO₂ aus der Atmosphäre direkt aus der Luft abgefangen, wird es bei Verbrennung des E-Fuels in die Atmosphäre zurück emittiert und der Kohlenstoffkreislauf wieder geschlossen. Stammt das CO₂ für den E-Fuel aus dem Abgas der Verbrennung eines fossilen Brennstoffs, wird davon ausgegangen, dass das CO₂ ohnehin in die Atmosphäre gelangt, was dem Verbrennungszweck (z. B. Wärme) des fossilen Brennstoffs zugeordnet wird, so dass das CO₂ des E-Fuels für die vorliegende LCA mit Null berechnet wird.

3.4.3 Kumulierter Primärenergieaufwand

Abhängig von Anzahl und Art der finalen Energieträger, z. B. Kraftstoffe oder Strom, wird die Menge an Primärenergie berechnet, die erforderlich ist, um die für die Verkehrssysteme benötigte Energie zu liefern. Dabei werden folgende Primärenergiequellen betrachtet:

- Fossile Ressourcen: Kohle, Öl und Gas
- Erneuerbare Ressourcen: Wasserkraft, Biomasse, Sonnenenergie, Windkraft
- Sonstige Ressourcen: z. B. Kernenergie, Müll, Abfälle.

3.5 Vergleich mit anderen Methoden

Neben der Methodik der Lebenszyklusanalyse gibt es auch andere Methoden zur Beurteilung von Umweltauswirkungen. Die wichtigsten anderen gebräuchlichen Methoden sind:

1. WtW-Analyse: Well-to-Wheel als Summe von Well-to-Tank (WtT) und Tank-to-Wheel (TtW) und
2. Methode nach der Erneuerbare-Energien-Richtlinie (Renewable Energy Directive, RED) zur Beurteilung der Treibhausgasreduzierung durch Kraftstoffe aus erneuerbaren Quellen.

Aufgrund der unterschiedlichen Methodik lassen sich die Ergebnisse dieser Methoden nicht mit den LCA-Ergebnissen vergleichen.

3.5.1 Well-to-WheelAnalyse (WtW)

Eine WtW-Analyse konzentriert sich auf die Untersuchung der Umweltauswirkungen, die sich aus der Bereitstellung von Kraftstoff/Energie an der Tankstelle (WtW, Well-to-Tank) und der Transportleistung mit dem Fahrzeug (TtW, Tank-to-Wheel) ergeben. Dabei werden aber die Effekte der Produktion und des Lebensendes der Anlagen und Fahrzeuge außer Acht gelassen.

Da die Produktion eines Batterie-Elektrofahrzeugs und eines Brennstoffzellenfahrzeugs deutlich stärkere Umweltauswirkungen als ein Verbrennerfahrzeug haben kann, ist ein vernünftiger Vergleich mit einer WtW-Analyse nicht möglich.

Zudem lässt die WtW-Analyse auch die Umweltauswirkungen der Produktion der Anlagen außer Acht. Das heißt, die Bereitstellung erneuerbarer Energie (z. B. Strom aus Photovoltaik oder Windkraft) hat keine Umweltauswirkungen, was nicht zutrifft, da die Produktion z. B. einer PV-Anlage mit Treibhausgasemissionen verbunden ist, die dem über die Lebensdauer der PV-

Anlage erzeugten Strom zuzuordnen sind. Somit ist die WtW-Analyse keine angemessene Methode für die umweltbezogene Beurteilung von Transportsystemen.

3.5.2 Methode gemäß der Erneuerbare-Energien-Richtlinie (RED)

Die Methode gemäß der Erneuerbare-Energien-Richtlinie (RED, 2009/28/EU), die als Rechtsgrundlage für die Beurteilung der mindestens erforderlichen Treibhausgassenkung erneuerbarer Brennstoffe im Vergleich zu fossilen Brennstoffen dient, basiert neben anderen Vereinfachungen auf der WtW-Analyse und ist ausschließlich für die Analyse von Treibhausgasemissionen vorgesehen.

Die wichtigsten Vereinfachungen sind:

- Energieallokation für Nebenprodukte und Biokraftstoffe
- Produktion und Lebensende von Anlagen werden nicht berücksichtigt
- CH₄- und N₂O-Emissionen von Fahrzeugen sind mit Null angesetzt.

3.6 Datenblätter

Neben dem detaillierten Bericht über die Basisdaten und Ergebnisse wird für jedes analysierte Verkehrssystem ein Datenblatt erstellt. Das Datenblatt ist eine kompakte Zusammenfassung der wichtigsten Eingabedaten und LCA-Ergebnisse, die es erleichtert, die Hauptergebnisse darzustellen und die LCA-Ergebnisse den Stakeholdern zu kommunizieren, um das Verständnis für die LCA-Ergebnisse der jeweiligen Verkehrssysteme zu schaffen bzw. zu vertiefen.

Zu den Hauptaspekten der Datenblätter gehören (Abbildung 9): Für die Erstellung der Datenblätter gilt:

- 1 Seite Zusammenfassung der Hauptaspekte und LCA-Ergebnisse
- Erstellung mit einem LCA-Tool
- Für jedes betrachtete Verkehrssystem (einschl. Stand der Technik 2019, 2030 und 2050)
- Schema der Prozesskette: von der Ressource bis zur Transportleistung (einschl. Nebenprodukten)
- Kurzbeschreibung des Verkehrssystems
- Hauptdaten und Annahmen

- Fahrzeug
- Energieträger (Kraftstoff, Wasserstoff, Strom)
- Produktion und Demontage des Fahrzeugs
- Tabellen und Abbildungen z. B. zu:
 - Treibhausgasemissionen (CO₂, CH₄, N₂O)
 - Kumuliertem Primärenergieaufwand (fossil, erneuerbar, sonstige)
- Quellen von Umweltauswirkungen
 - Fahrzeugproduktion
 - Bereitstellung des Energieträgers
 - Fahrzeugbetrieb

Das Datenblatt wurde in Abstimmung mit den Stakeholdern und unter Berücksichtigung ihres Hauptinteresses (siehe Kapitel 3.7) entwickelt und finalisiert.

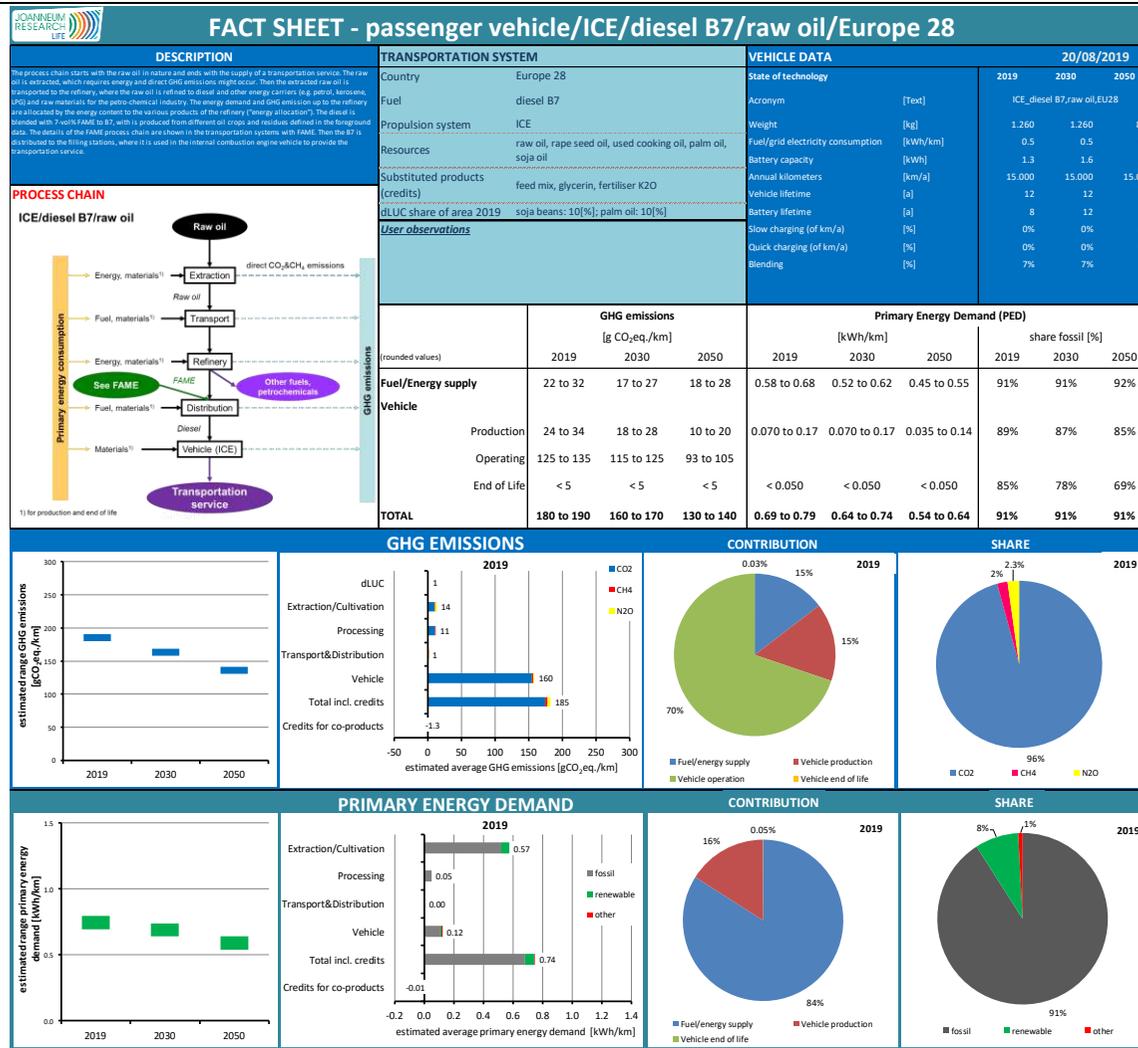


Abbildung 9: Konzept des Datenblattes

3.7 Stakeholder-Einbindung

Für den Stakeholder-Prozess wurden von der FIA und dem ÖAMTC Stakeholder benannt. Die Stakeholder wurden eingebunden, um Informationen über die LCA auszutauschen und Verständnis und Akzeptanz hinsichtlich der LCA-Methodik, der Basisdaten und der LCA-Ergebnisse zu den Umweltauswirkungen zu verbessern.

Im Rahmen der Abstimmung mit den Stakeholdern wurden folgende Punkte präsentiert und diskutiert (Abbildung 10):

- LCA-Methodik
- Auswahl des analysierten Verkehrssystems
- Haupt-Basisdaten
- Entwurf und finale Fassung der LCA-Ergebnisse
- Entwurf und finale Fassung der Datenblätter
- Einführung in das LCA-Tool
- Schulung zum LCA-Tool

Unter Berücksichtigung des Feedbacks aus dem Abstimmungsprozess mit den Stakeholdern wurden die vorläufigen Ergebnisse zu den oben genannten Themen überarbeitet und finalisiert.

Jeden Monat fand eine Telefonkonferenz statt, in der der Fortgang der Analyse präsentiert und erörtert sowie wichtige Entscheidungen getroffen wurden (z. B. Auswahl der Verkehrssysteme, Festlegung der Zielgruppe für das Tool und den Bericht Schlüsselfunktionen des Tools).

Als Stakeholder waren zu diesen Telefonkonferenzen eingeladen:

- ÖAMTC
- ADAC
- FIA
- TCS

Das Projekt, sein Fortgang und (erste) Ergebnisse wurden bei folgenden FIA-Sitzungen präsentiert und erörtert:

- Madrid/Spanien: 26. April 2018
- St. Petersburg/Russland: 4. und 6. Dezember 2018
- Brüssel/Belgien: 21. Mai 2019

- Paris/Frankreich: 27. Juni 2019

Zudem testeten die Teilnehmer der Telefonkonferenzen die Vorabversion des Tools, wobei ihre Erfahrungen und ihr Feedback in die Fertigstellung des Tools einfließen. Im Februar fanden beim ÖAMTC in Wien auch ein Test und eine Schulung zur Feinabstimmung des Tools statt.

- **LCA methodology**
- **Selection of analyzed transportation system**
- **Main basic data**
- **Draft and final LCA results**
- **Draft and final Fact Sheets**
- **Introduction to LCA TOOL**
- **Draft and final report**
- **Training course on LCA TOOL**
- **Testing of the tool**




 FEDERATION INTERNATIONALE DE L'AUTOMOBILE

Abbildung 10: Übersicht zur Stakeholder-Einbindung

4. Verkehrssysteme

4.1 Hauptmerkmale

Die Verkehrssysteme werden durch folgenden sechs Merkmale genau definiert (Abbildung 11):

1. Fahrzeugtyp
2. Antriebssystem
3. Kraftstoff/Energieträger
4. Art der Primärenergie
5. Stand der Technik
6. Land (wo zutreffend)

Bei E-Fuels ist zudem die Kohlenstoffquelle (z. B. Luft, Abgas) ein relevantes Systemmerkmal.

Die Nennung jedes Verkehrssystems spiegelt diese Merkmale wie folgt wider:

„Fahrzeug/Antrieb/Kraftstoff/Ressource/Technik/Land“, z. B. Pkw/ICE/Diesel/Rohöl/2018.

Die wichtigsten Unterkategorien dieser Merkmale sind:

- Fahrzeugtyp:
 - LNF – leichtes Nutzfahrzeug; stellt das C-Segment, die sog. „Golf-Klasse“, dar
- Antriebssystem
 - ICE – Verbrennungsmotor
 - BEV – Batterie-Elektrofahrzeug
 - HFC – Wasserstoffbrennstoffzelle
 - PHEV – Plug-in-Hybrid
- Kraftstoff/Energieträger
 - Fossile Kraftstoffe: Diesel, Benzin, komprimiertes Erdgas (CNG)
 - Biokraftstoffe: FAME (Biodiesel), hydriertes Pflanzenöl, Bioethanol, komprimiertes erneuerbares Gas (CRG) (Biomethan aus Biogasaufbereitung und thermischer Vergasung von Biomasse), FT-Diesel, E-Fuels (flüssige oder gasförmige Kraftstoffe, die mittels Strom aus einer Kohlenstoffquelle hergestellt werden, vorwiegend CO₂ aus Luft, fossilem Brennstoff oder Biomasse-Verbrennung)
 - Strom aus verschiedenen Quellen
 - Wasserstoff aus verschiedenen Quellen
- Art der Primärenergie
 - Öl, Gas, Kohle, Kernenergie
 - Biomasse: Land- und Forstwirtschaft
 - Windkraft, Wasserkraft, Solarenergie
- Stand der Technik
 - 2019
 - 2030
 - 2050
- Länder (nur sofern zutreffend)
 - EU-28 – Europäische Union
 - AT – Österreich
 - CH – Schweiz
 - DE – Deutschland
 - ES – Spanien
 - IT – Italien
 - UK – Vereinigtes Königreich
 - PL - Polen
 - PT – Portugal
 - AU – Australien
 - CA – Kanada

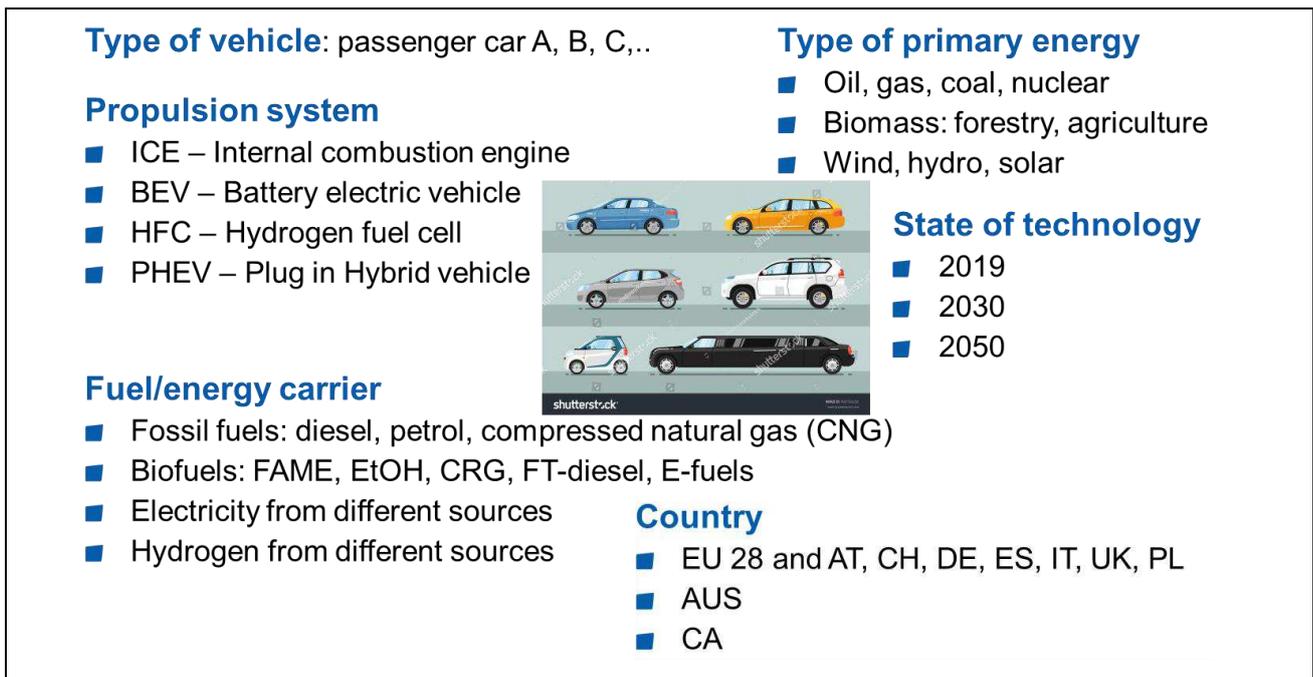


Abbildung 11: Systematik der Verkehrssysteme

4.2 Identifikation der wichtigsten Systeme

Während des Stakeholder-Prozesses wurden die interessantesten Verkehrssysteme oder deren Kombinationen identifiziert, wobei die folgenden, zu analysierenden Elemente abzudecken waren:

- Fahrzeugtyp: „Golf-Klasse“/C-Segment
- Antriebssystem
 - ICE² – Verbrennungsmotor mit flüssigen und gasförmigen, kohlenstoffhaltigen Kraftstoffen fossilen oder biogenen Ursprungs (kein Wasserstoff)
 - BEV – Batterie-Elektrofahrzeug mit unterschiedlichen Stromquellen und länderspezifischen Strommischen
 - HFC - Wasserstoffbrennstoffzelle (einschl. Batterie)
 - PHEV - Plug-in-Hybrid mit ICE
- Kraftstoff/Energieträger
 - Fossile Kraftstoffe:
 - Diesel (einschl. unterschiedlicher Beimischungen von Biodiesel, z. B. B7)
 - Benzin (einschl. unterschiedlicher Beimischungen von Bioethanol, z. B. E10)

²Alle möglichen Hybride (seriell, parallel) mit ICE (ausgenommen PHEV) werden in künftigen ICE-Antriebssystemen berücksichtigt.

- Komprimiertes Erdgas (CNG)³ (einschl. unterschiedlicher Beimischungen von Biomethan (CRG), CRG5)
 - Biokraftstoffe:
 - Biodiesel (FAME – Fettsäuremethylester)
 - Hydriertes Pflanzenöl (HVO)
 - Bioethanol (EtOH)
 - Biomethan (CRG) aus Biomasse-Vergasung oder -Fermentation (Biogas) und als E-Fuel
 - FT-Diesel (Fischer-Tropsch-Diesel aus Biomasse-Vergasung und als E-Fuel)
 - Nutzpflanzenbasierte Biokraftstoffe aus Getreide und Ölsamen
 - Fortgeschrittene Biokraftstoffe aus Holz, Stroh und Abfällen
 - E-Fuels, die aus einer Kohlenstoffquelle (CO₂ oder Biomasse) mittels Strom aus erneuerbaren Quellen erzeugt werden, z. B. Power-to-Liquid (PtL), Power-to-Gas (PtG), Biomass&Power-to-Liquid (BtL), Biomass&Power-to-Gas (BPtG)
 - Strom aus
 - verschiedenen erneuerbaren Quellen und
 - dem Strommix in ausgewählten Ländern (EU-28, Österreich, Deutschland, Vereinigtes Königreich, Schweiz, Spanien, Polen, Italien, Australien, Kanada)
 - Gasförmiger Wasserstoff (GH₂)⁴ aus
 - Erdgas-Dampfreformierung und
 - Elektrolyse mit Strom aus erneuerbaren Quellen
- Art der Primärenergie
 - Öl, Gas, Kohle, Kernenergie
 - Biomasse: Landwirtschaft, Forstwirtschaft, Abfälle
 - Windkraft, Wasserkraft, Solarenergie
- Stand der Technik
 - 2019
 - 2030
 - 2050

³ Flüssigerdgas wird nicht berücksichtigt.

⁴ Flüssigwasserstoff (LH₂) wird nicht berücksichtigt.

4.3 Ausgewählte Systeme

Insgesamt wurden 64 Pkw-basierte Verkehrssysteme unter Einbindung der Stakeholder ausgewählt. Jedes Verkehrssystem wurde nach dem jeweiligen Stand der Technik in den Jahren 2019, 2030 und 2050 analysiert. Die Verkehrssysteme wurden dabei in die folgenden sechs Gruppen unterteilt:

- Verbrennerfahrzeug (ICEV) mit fossilem Kraftstoff (einschl. Beimischung von Biokraftstoffen): 7 Systeme, siehe Tabelle 1
- Plug-in-Hybrid mit fossilem Kraftstoff und Strom (PHEV): 22 Systeme, siehe Tabelle 2
- Batterie-Elektrofahrzeug (BEV): 14 Systeme, siehe Tabelle 3
- Wasserstoffbrennstoffzellen-Fahrzeug (HFCV): 4 Systeme, siehe Tabelle 4
- Biokraftstoff-Verbrennerfahrzeug (ICEV): 5 Systeme, siehe Tabelle 5, und
- E-Fuel-Verbrennerfahrzeug (ICEV): 12 Systeme, siehe Tabelle 6

Tabelle 1: Ausgewählte Verkehrssysteme mit Verbrennerfahrzeugen (ICEV) mit fossilem Kraftstoff (einschl. Beimischung von Biokraftstoffen)

#	Propulsion system	fuel/energy	Resource	State of technology	Country	Abbreviation
1	ICE	petrol	raw oil	2019/2030/2050	EU28	ICE_petrol/raw oil/2019/2030/2050/EU28
2	ICE	petrol E5	raw oil&biomass mix	2019/2030/2050	EU28	ICE_petrol E5/raw oil&biomass mix/2019/2030/2050/EU28
3	ICE	petrol E10	raw oil&biomass mix	2019/2030/2050	EU28	ICE_petrol E10/raw oil&biomass mix/2019/2030/2050/EU28
4	ICE	diesel	raw oil	2019/2030/2050	EU28	ICE_diesel/raw oil/2019/2030/2050/EU28
5	ICE	diesel B7	raw oil&biomass mix	2019/2030/2050	EU28	ICE_diesel B7/raw oil&biomass mix/2019/2030/2050/EU28
6	ICE	CNG	natural gas	2019/2030/2050	EU28	ICE_CNG/natural gas/2019/2030/2050/EU28
7	ICE	CNG CRG5	natural gas&biomass mix	2019/2030/2050	EU28	ICE_CNG CRG5/natural gas&biomass mix/2019/2030/2050/EU28

Tabelle 2: Ausgewählte Verkehrssysteme mit Plug-in-Hybriden mit fossilem Kraftstoff und Strom (PHEV)

#	Propulsion system	fuel/energy	Resource	State of technology	Country	Abbreviation
8	PHEV	petrol&el.	raw oil&electr.mix	2019/2030/2050	EU28	PHEV_petrol&el./raw oil&electr.mix/2019/2030/2050/EU28
9	PHEV	petrol&el.	raw oil&electr.mix	2019/2030/2050	AT	PHEV_petrol&el./raw oil&electr.mix/2019/2030/2050/AT
10	PHEV	petrol&el.	raw oil&electr.mix	2019/2030/2050	DE	PHEV_petrol&el./raw oil&electr.mix/2019/2030/2050/DE
11	PHEV	petrol&el.	raw oil&electr.mix	2019/2030/2050	CH	PHEV_petrol&el./raw oil&electr.mix/2019/2030/2050/CH
12	PHEV	petrol&el.	raw oil&electr.mix	2019/2030/2050	IT	PHEV_petrol&el./raw oil&electr.mix/2019/2030/2050/IT
13	PHEV	petrol&el.	raw oil&electr.mix	2019/2030/2050	UK	PHEV_petrol&el./raw oil&electr.mix/2019/2030/2050/UK
14	PHEV	petrol&el.	raw oil&electr.mix	2019/2030/2050	ES	PHEV_petrol&el./raw oil&electr.mix/2019/2030/2050/ES
15	PHEV	petrol&el.	raw oil&electr.mix	2019/2030/2050	PT	PHEV_petrol&el./raw oil&electr.mix/2019/2030/2050/PT
16	PHEV	petrol&el.	raw oil&electr.mix	2019/2030/2050	PL	PHEV_petrol&el./raw oil&electr.mix/2019/2030/2050/PL
17	PHEV	petrol&el.	raw oil&electr.mix	2019/2030/2050	AUS	PHEV_petrol&el./raw oil&electr.mix/2019/2030/2050/AUS
18	PHEV	petrol&el.	raw oil&electr.mix	2019/2030/2050	CA	PHEV_petrol&el./raw oil&electr.mix/2019/2030/2050/CA
19	PHEV	diesel&el.	raw oil&electr.mix	2019/2030/2050	EU28	PHEV_diesel&el./raw oil&electr.mix/2019/2030/2050/EU28
20	PHEV	diesel&el.	raw oil&electr.mix	2019/2030/2050	AT	PHEV_diesel&el./raw oil&electr.mix/2019/2030/2050/AT
21	PHEV	diesel&el.	raw oil&electr.mix	2019/2030/2050	DE	PHEV_diesel&el./raw oil&electr.mix/2019/2030/2050/DE
22	PHEV	diesel&el.	raw oil&electr.mix	2019/2030/2050	CH	PHEV_diesel&el./raw oil&electr.mix/2019/2030/2050/CH
23	PHEV	diesel&el.	raw oil&electr.mix	2019/2030/2050	IT	PHEV_diesel&el./raw oil&electr.mix/2019/2030/2050/IT
24	PHEV	diesel&el.	raw oil&electr.mix	2019/2030/2050	UK	PHEV_diesel&el./raw oil&electr.mix/2019/2030/2050/UK
25	PHEV	diesel&el.	raw oil&electr.mix	2019/2030/2050	ES	PHEV_diesel&el./raw oil&electr.mix/2019/2030/2050/ES
26	PHEV	diesel&el.	raw oil&electr.mix	2019/2030/2050	PT	PHEV_diesel&el./raw oil&electr.mix/2019/2030/2050/PT
27	PHEV	diesel&el.	raw oil&electr.mix	2019/2030/2050	PL	PHEV_diesel&el./raw oil&electr.mix/2019/2030/2050/PL
28	PHEV	diesel&el.	raw oil&electr.mix	2019/2030/2050	AUS	PHEV_diesel&el./raw oil&electr.mix/2019/2030/2050/AUS
29	PHEV	diesel&el.	raw oil&electr.mix	2019/2030/2050	CA	PHEV_diesel&el./raw oil&electr.mix/2019/2030/2050/CA

Tabelle 3: Ausgewählte Verkehrssysteme mit Batterie-Elektrofahrzeugen (BEV)

#	Propulsion system	fuel/energy	Resource	State of technology	Country	Abbreviation
30	BEV	electricity	electr. mix	2019/2030/2050	EU28	BEV_electricity/electr. mix/2019/2030/2050/EU28
31	BEV	electricity	PV	2019/2030/2050	EU28	BEV_electricity/PV/2019/2030/2050/EU28
32	BEV	electricity	wind	2019/2030/2050	EU28	BEV_electricity/wind/2019/2030/2050/EU28
33	BEV	electricity	hydro	2019/2030/2050	EU28	BEV_electricity/hydro/2019/2030/2050/EU28
34	BEV	electricity	electr. mix	2019/2030/2050	AT	BEV_electricity/electr. mix/2019/2030/2050/AT
35	BEV	electricity	electr. mix	2019/2030/2050	DE	BEV_electricity/electr. mix/2019/2030/2050/DE
36	BEV	electricity	electr. mix	2019/2030/2050	CH	BEV_electricity/electr. mix/2019/2030/2050/CH
37	BEV	electricity	electr. mix	2019/2030/2050	IT	BEV_electricity/electr. mix/2019/2030/2050/IT
38	BEV	electricity	electr. mix	2019/2030/2050	UK	BEV_electricity/electr. mix/2019/2030/2050/UK
39	BEV	electricity	electr. mix	2019/2030/2050	ES	BEV_electricity/electr. mix/2019/2030/2050/ES
40	BEV	electricity	electr. mix	2019/2030/2050	PT	BEV_electricity/electr. mix/2019/2030/2050/PT
41	BEV	electricity	electr. mix	2019/2030/2050	PL	BEV_electricity/electr. mix/2019/2030/2050/PL
42	BEV	electricity	electr. mix	2019/2030/2050	AUS	BEV_electricity/electr. mix/2019/2030/2050/AUS
43	BEV	electricity	electr. mix	2019/2030/2050	CA	BEV_electricity/electr. mix/2019/2030/2050/CA

Tabelle 4: Ausgewählte Verkehrssysteme mit Wasserstoffbrennstoffzellen-Fahrzeugen (HFCV)

#	Propulsion system	fuel/energy	Resource	State of technology	Country	Abbreviation
44	HFC	hydrogen	natural gas	2019/2030/2050	EU28	HFC_hydrogen/natural gas/2019/2030/2050/EU28
45	HFC	hydrogen	PV	2019/2030/2050	EU28	HFC_hydrogen/PV/2019/2030/2050/EU28
46	HFC	hydrogen	wind	2019/2030/2050	EU28	HFC_hydrogen/wind/2019/2030/2050/EU28
47	HFC	hydrogen	hydro	2019/2030/2050	EU28	HFC_hydrogen/hydro/2019/2030/2050/EU28

Tabelle 5: Ausgewählte Verkehrssysteme mit Biokraftstoff-Verbrennerfahrzeugen (ICEV)

#	Propulsion system	fuel/energy	Resource	State of technology	Country	Abbreviation
48	ICE	FAME	biomass mix	2019/2030/2050	EU28	ICE_FAME/biomass mix/2019/2030/2050/EU28
49	ICE	HVO	biomass mix	2019/2030/2050	EU28	ICE_HVO/biomass mix/2019/2030/2050/EU28
50	ICE	EtOH	biomass mix	2019/2030/2050	EU28	ICE_EtOH/biomass mix/2019/2030/2050/EU28
51	ICE	FT diesel	straw&wood	2019/2030/2050	EU28	ICE_FT diesel/straw&wood/2019/2030/2050/EU28
52	ICE	CRG	straw&wood, biogas mix	2019/2030/2050	EU28	ICE_CRG/straw&wood, biogas mix/2019/2030/2050/EU28

Tabelle 6: Ausgewählte Verkehrssysteme mit E-Fuel-Verbrennerfahrzeugen (ICEV)

#	Propulsion system	fuel/energy	Resource	State of technology	Country	Abbreviation
53	ICE	E-fuel FT diesel	H2 wind&CO2 air	2019/2030/2050	EU28	ICE_E-fuel FT diesel/H2 wind&CO2 air/2019/2030/2050/EU28
54	ICE	E-fuel FT diesel	H2 wind&CO2 ind	2019/2030/2050	EU28	ICE_E-fuel FT diesel/H2 wind&CO2 ind/2019/2030/2050/EU28
55	ICE	E-fuel FT diesel	H2 wind&biomass	2019/2030/2050	EU28	ICE_E-fuel FT diesel/H2 wind&biomass/2019/2030/2050/EU28
56	ICE	E-fuel CRG	H2 wind&CO2 air	2019/2030/2050	EU28	ICE_E-fuel CRG/H2 wind&CO2 air/2019/2030/2050/EU28
57	ICE	E-fuel CRG	H2 wind&CO2 ind	2019/2030/2050	EU28	ICE_E-fuel CRG/H2 wind&CO2 ind/2019/2030/2050/EU28
58	ICE	E-fuel CRG	H2 wind&biomass	2019/2030/2050	EU28	ICE_E-fuel CRG/H2 wind&biomass/2019/2030/2050/EU28
59	ICE	E-fuel FT diesel	electr. mix&CO2 air	2019/2030/2050	EU28	ICE_E-fuel FT diesel/electr. mix&CO2 air/2019/2030/2050/EU28
60	ICE	E-fuel FT diesel	electr. mix&CO2 ind	2019/2030/2050	EU28	ICE_E-fuel FT diesel/electr. mix&CO2 ind/2019/2030/2050/EU28
61	ICE	E-fuel FT diesel	electr. mix&CO2 biomass	2019/2030/2050	EU28	ICE_E-fuel FT diesel/electr. mix&CO2 biomass/2019/2030/2050/EU28
62	ICE	E-fuel CRG	electr. mix&CO2 air	2019/2030/2050	EU28	ICE_E-fuel CRG/electr. mix&CO2 air/2019/2030/2050/EU28
63	ICE	E-fuel CRG	electr. mix&CO2 ind	2019/2030/2050	EU28	ICE_E-fuel CRG/electr. mix&CO2 ind/2019/2030/2050/EU28
64	ICE	E-fuel CRG	electr. mix&CO2 biomass	2019/2030/2050	EU28	ICE_E-fuel CRG/electr. mix&CO2 biomass/2019/2030/2050/EU28

4.4 Schematische Darstellung der Prozesskette

4.4.1 Beschreibung

Die schematische Darstellung der Prozesskette zeigt die wichtigsten Prozesse in der LCA eines Verkehrssystems vom Hauptrohstoff in der Natur (oben) bis zur bereitgestellten Transportleistung (unten).

Die fünf wichtigsten Prozessstufen sind (**Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**):

1. Rohstoffanbau, -ernte oder -gewinnung
2. Rohstofftransport
3. Umwandlung von Rohstoffen in Transportkraftstoff unter möglicher Herstellung von Nebenprodukten
4. Verteilung von Transportkraftstoff/-energie einschl. Tankstelle/Ladestation
5. Fahrzeug, das den Transportkraftstoff nutzt

Die wesentlichen Inputs der Prozessstufen sind Energie (z. B. Strom, Brenn-/Kraftstoffe), Hilfsstoffe (z. B. Dünger, Chemikalien) und Materialien für die Produktion der Anlagen (z. B. die Materialien für die Fahrzeugproduktion, einschließlich der Batterie für BEV und der Energie für Fertigung und Montage).

Neben Transportkraftstoffen sind als wesentliche Outputs einer Prozessstufe Treibhausgasemissionen und Nebenprodukte (z. B. Tierfutter, Chemikalien, Wärme) zu nennen.

Oberhalb einer Prozessstufe ist deren wichtigster Input (z. B. Rohöl, Wasserstoff) gezeigt; ein Pfeil stellt die Verbindung von der vorhergehenden Stufe der Prozesskette dar. Am unteren Ende einer Prozessstufe ist der wichtigste Output (z. B. Diesel, Strom) gezeigt, wobei ein Pfeil den Prozess mit der nächsten Stufe der Prozesskette verbindet.

Auf der linken Seite ist der Input in Form des kumulierten Primärenergieaufwands dargestellt, der dem Energie- und Materialbedarf zugeordnet und in der LCA berechnet wird.

Auf der rechten Seite ist der Output in Form von Treibhausgasemissionen (einschl. CO₂, CH₄ und N₂O) dargestellt, der dem Energie- und Materialbedarf zugeordnet und in der LCA berechnet wird.

Die Treibhausgasemissionen umfassen

- direkte Emissionen aus der Kraftstoffverbrennung in der Prozessstufe
- direkte Emissionen aus Verarbeitung oder Verlust (z. B. CH₄ aus der Erdgasgewinnung, N₂O aus der Düngung)
- indirekte Emissionen aus der Bereitstellung von Energie und Materialien sowie aus Produktion und Lebensende der Anlagen

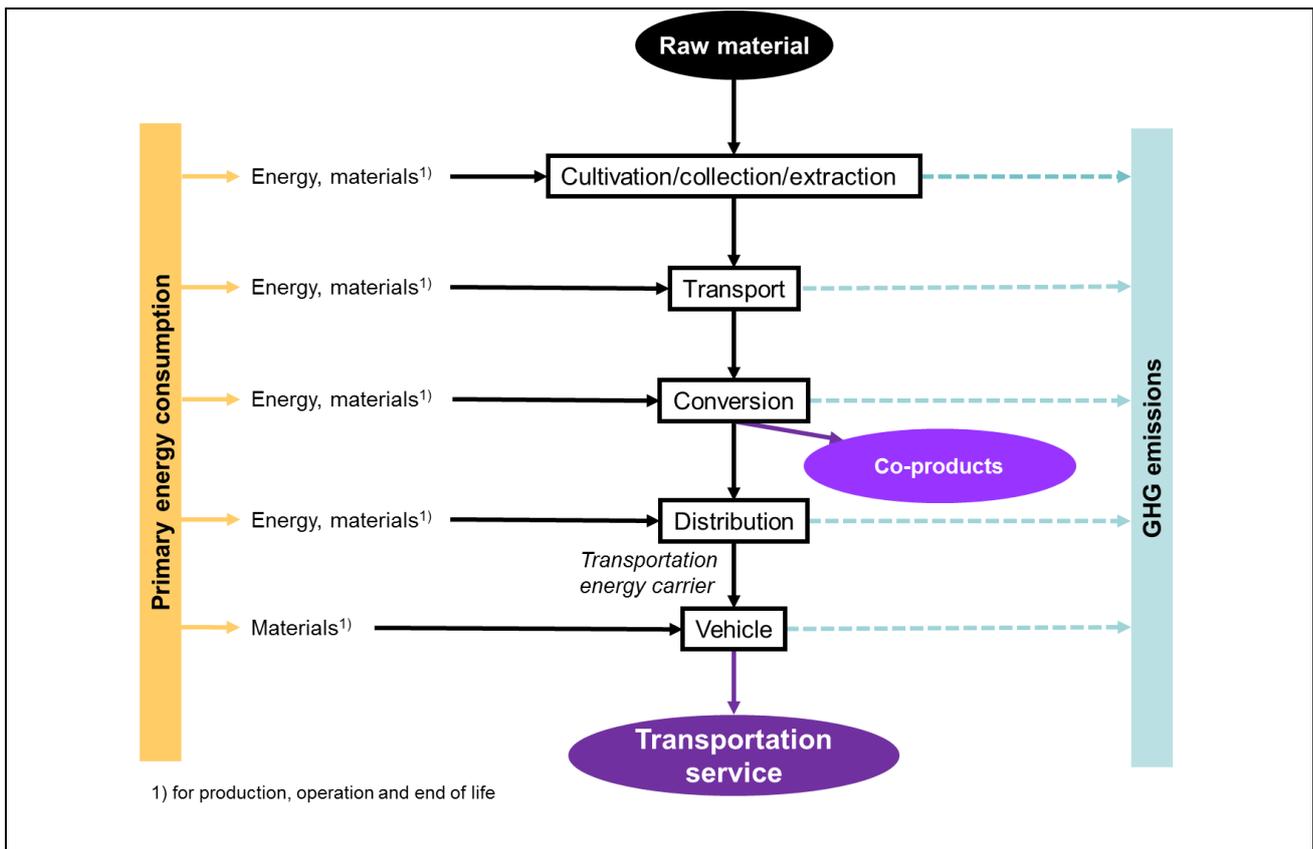


Abbildung 12: Allgemeines Schema der Prozesskette für das Verkehrssystem

4.4.2 Beispiele

Für eine nähere Beschreibung wurden einige Beispiele für analysierte Prozessketten ausgewählt. Die ausgewählten Beispiele sind repräsentativ für alle 64 Verkehrssysteme, da es sich bei den übrigen um Varianten der hier gezeigten handelt. Die neun Beispiele sind nachfolgend angegeben, wobei sich die Nummer (#) auf die ausgewählten Verkehrssysteme in Kapitel 4.3 bezieht:

1. „ICE_Benzin/Rohöl/2019/2030/2050/EU-28“ (#1)
2. „ICE_FAME/Biomasse/Biomasse/2019/2030/2050/EU-28“ (#48)
3. „ICE_Diesel B7/Rohölmix/2019/2030/2050/EU-28“ (#5)
4. „BEV_Strom/Wind/2019/2030/2050/EU-28“ (#32)
5. „BEV_Strom/Strommix/2019/2030/2050/EU-28“ (#30)
6. „PHEV_Benzin&Strom/Rohöl&Strommix/2019/2030/2050/EU-28“ (#8)

7. „HFC_Wasserstoff/PV/2019/2030/2050/EU-28“ (#45)
8. „ICE_CRG/Stroh&Holz/2019/2030/2050/EU-28“ (#52)
9. „ICE_E-Fuel FT-Diesel/H2 Wind&CO2 Luft/2019/2030/2050/EU-28“ (#53)
10. „ICE_E-Fuel FT-Diesel/Strommix&CO2 Biomasse/2019/2030/2050/EU-28“ (#61)

In allen Beispielen ist die Prozesskette für den Stand der Technik in den Jahren 2019, 2030 und 2050 die gleiche.

Abbildung 13 zeigt die Prozesskette für „ICE_Benzin/Rohöl“. Die Prozesskette beginnt mit dem Rohöl in der Natur und endet mit der Erbringung einer Transportleistung. Das Rohöl wird gewonnen, wofür Energie benötigt wird. Hierbei können direkte Treibhausgasemissionen entstehen. Dann wird das gewonnene Rohöl zur Raffinerie transportiert, wo es zu verschiedenen Energieträgern (z. B. Benzin, Diesel, Kerosin, LPG) und Rohstoffen für die petrochemische Industrie verarbeitet wird. Der Energiebedarf und die Treibhausgasemissionen bis zur Raffinerie werden anhand des Energiegehaltes den verschiedenen Produkten der Raffinerie zugeordnet („Energieallokation“). Anschließend wird das Benzin an die Tankstellen geliefert, wo es im Verbrennerfahrzeug zur Erbringung der Transportleistung verwendet wird.

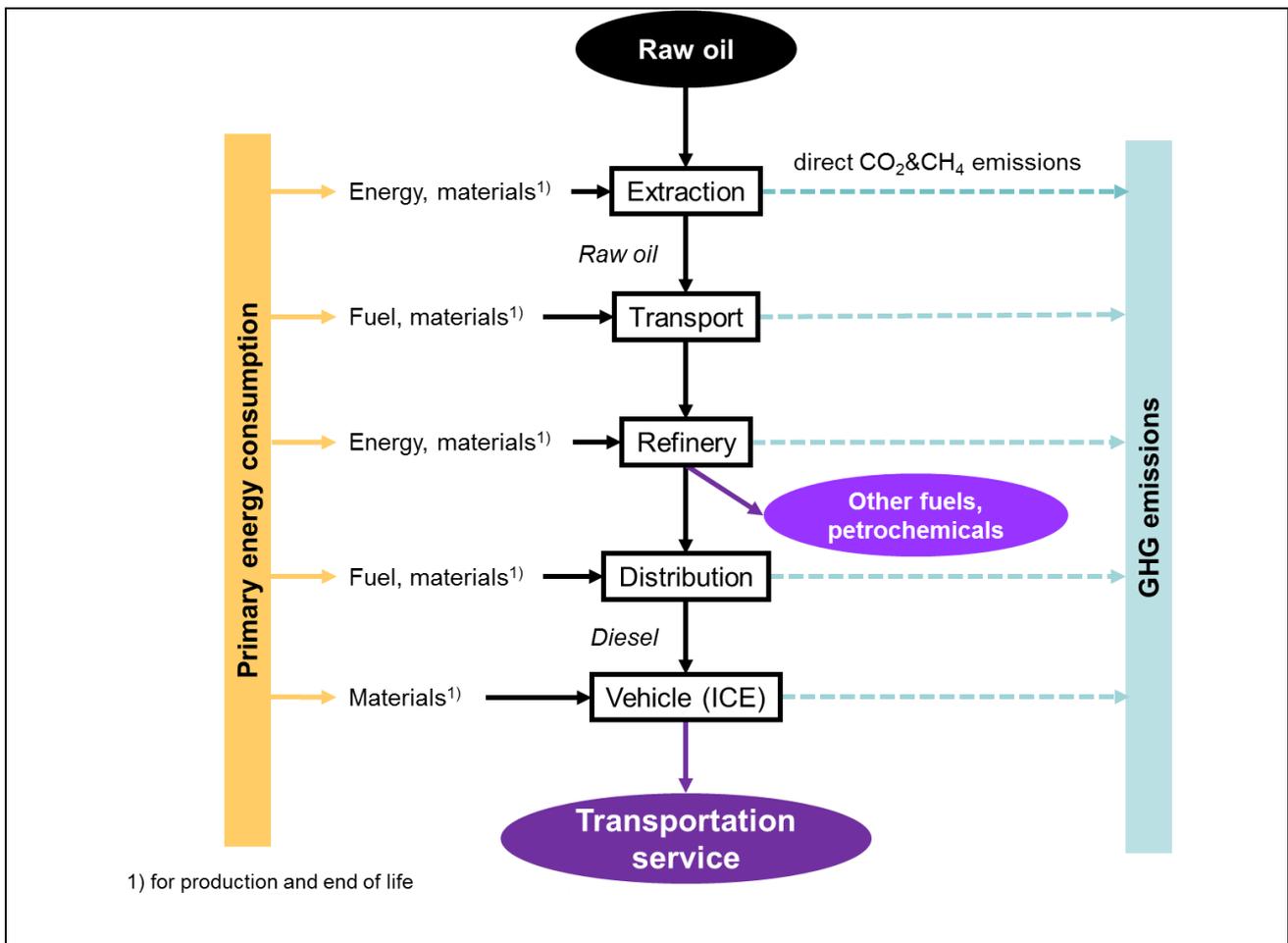


Abbildung 13: Prozesskette „ICE_Benzin/Rohöl/2019/2030/2050/EU-28“ (#1)

Abbildung 14 zeigt die Prozesskette für „ICE_FAME/Biomassemix“. Die Prozesskette beginnt bei landwirtschaftlichen Nutzflächen und bei Öl- und Fettrückständen aus Industrie oder Haushalt. Sie endet mit der Erbringung einer Transportleistung. Die Ölpflanzen werden in der Landwirtschaft angebaut und geerntet und die Rückstände gesammelt. Treibhausgasemissionen entstehen bei der Stickstoffdüngung in der Landwirtschaft als direkte N₂O-Emissionen. Das Stroh verbleibt auf dem Feld und wird untergepflügt, und die geernteten Ölpflanzen und gesammelten Abfälle werden zur Biodieselanlage transportiert. In der Biodieselanlage werden die Ölpflanzen gepresst, wobei Pflanzenöl und Futtermittel produziert werden. Der Rohstoffmix aus verschiedenen Ölpflanzen und Abfällen ist in den Vordergrunddaten definiert (Beschreibung der Vordergrunddaten siehe Kapitel 5.1 und 5.3). Der Anteil an produzierten Futtermitteln und Öl hängt hauptsächlich vom Ölgehalt der Pflanzen ab, z. B. etwa 35 % bei Raps. Die gesammelten Abfälle werden gereinigt. Anschließend wird das Pflanzenöl unter Verwendung von Methanol als Katalysator zu FAME umgeestert. Dabei

wird gleichzeitig Glycerin produziert. Das Tierfutter ersetzt andere Tierfuttermittel, z. B. Sojafutter. Das Glycerin ersetzt aus Erdgas gewonnenes Glycerin. Die Treibhausgasemissionen und die Energie aus diesen Substitutionseffekten werden vom Verkehrssystem abgezogen. Anschließend wird der FAME per Lkw an die Tankstellen geliefert, wo er im Verbrennerfahrzeug zur Bereitstellung der Transportleistung verwendet wird.

Abbildung 15 zeigt die Prozesskette für „ICE_Diesel B7/Rohöl&Biomasse mix“. Hier wird das Benzin mit 7 Vol-% FAME vermischt, so dass diese Prozesskette eine Kombination aus dem Benzin- und FAME-basierten Verkehrssystem (Abbildung 13 und Abbildung 14) ist.

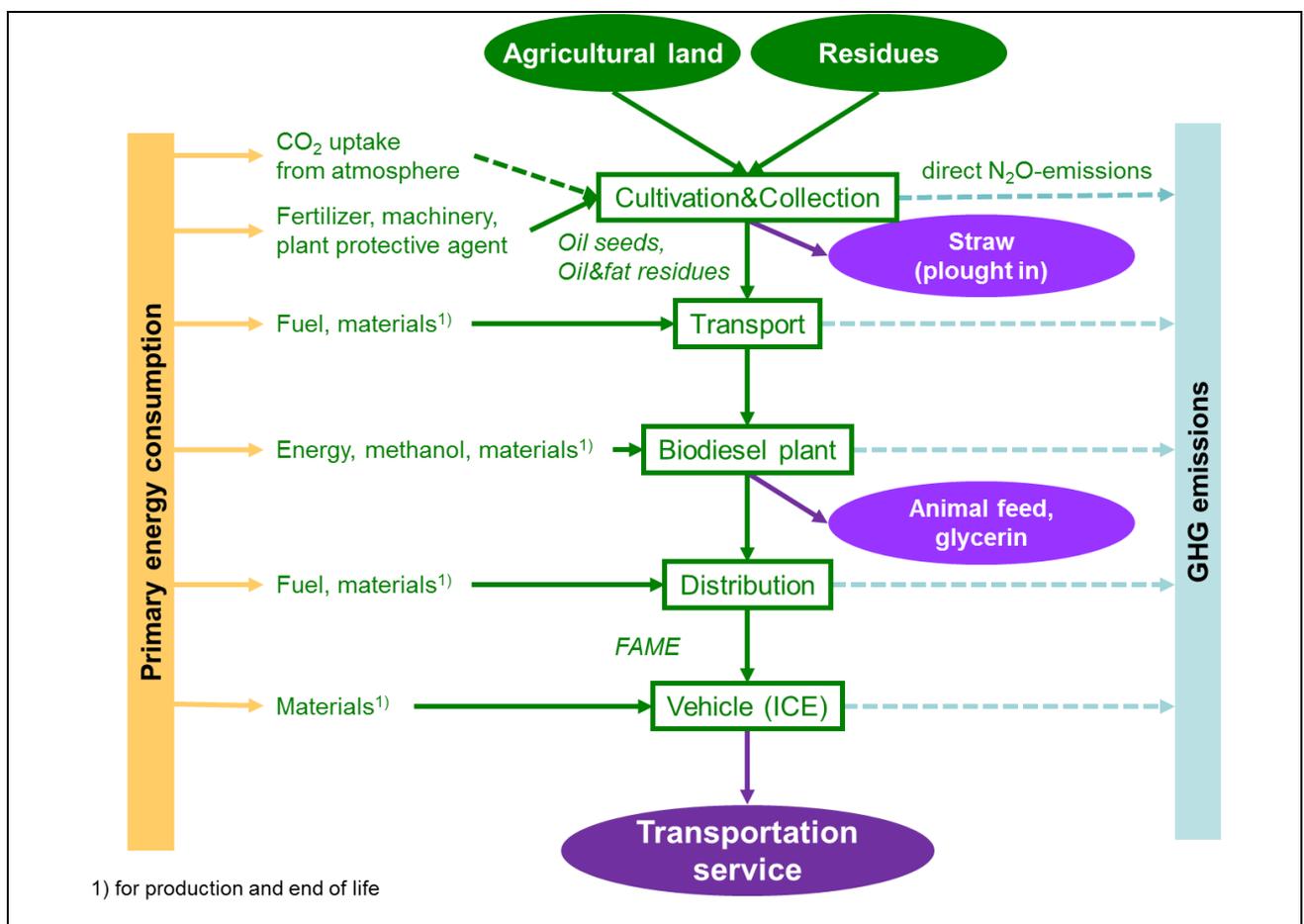


Abbildung 14: Prozesskette für „ICE_FAME/Biomasse mix/2019/2030/2050/EU-28“ (#48)

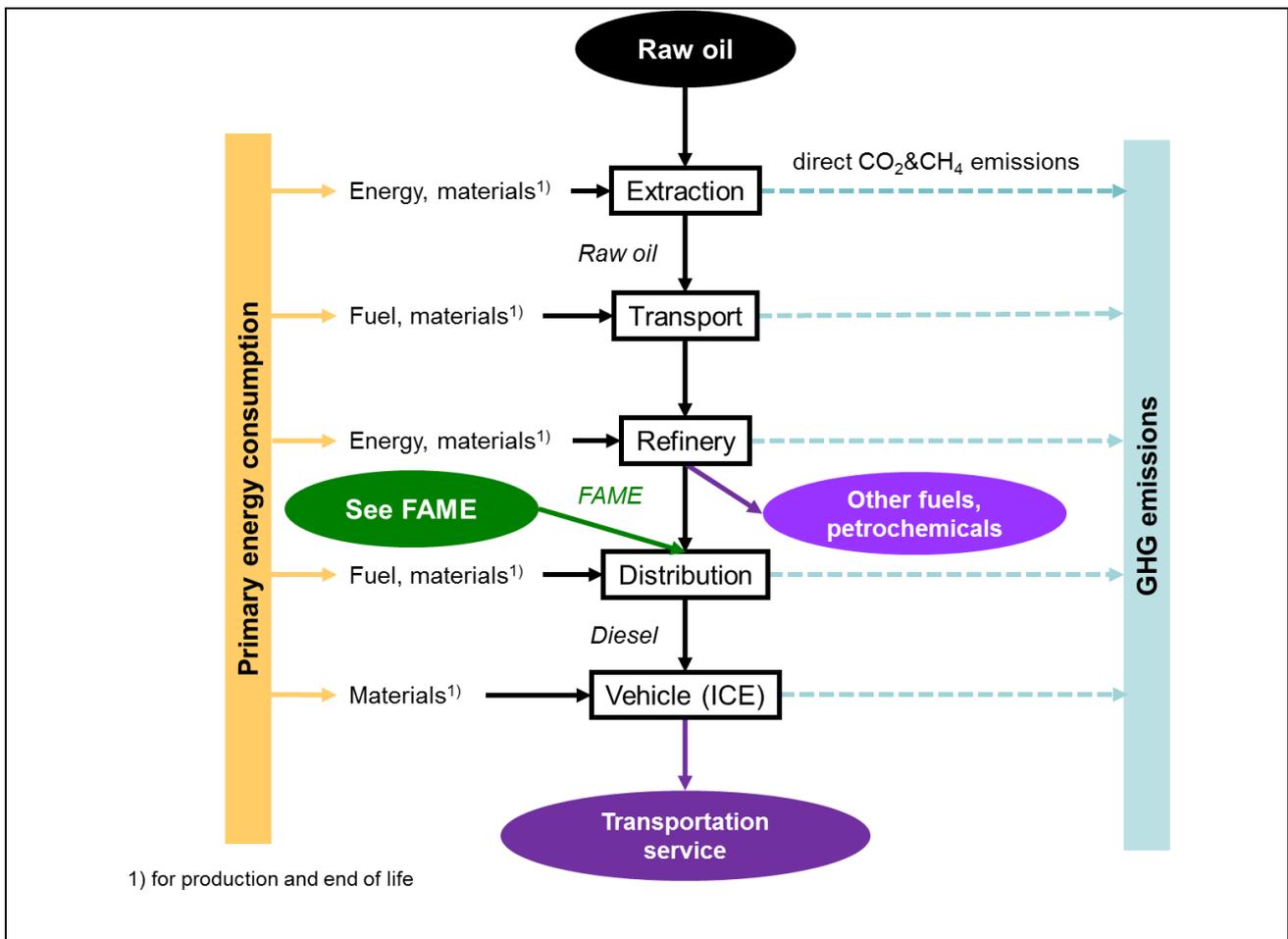


Abbildung 15: Prozesskette für „ICE_Diesel B7/Rohöl&Biomasse mix/2019/2030/2050/EU-28“ (#5)

Abbildung 16 zeigt die Prozesskette für „BEV_Strom/Wind“. Die Prozesskette beginnt mit der Windkraft in der Natur und endet mit der Erbringung einer Transportleistung durch ein Batterie-Elektrofahrzeug. Der Wind wird in einer Windkraftanlage zur Erzeugung von erneuerbarem Strom genutzt, der dann über das Stromnetz zur Ladestation transportiert wird. An der Ladestation wird der Strom zum Batteriefahrzeug gebracht, wo er zur Erbringung der Transportleistung verwendet wird. Wenn die Ladezeit des Batterie-Elektrofahrzeugs stark von der Zeit abweicht, in der die Windkraftanlage Strom erzeugt, wird zusätzlich ein Stromspeicher, z. B. ein Pumpwasserkraftwerk, berücksichtigt.

Abbildung 17 zeigt die Prozesskette für „BEV_Strom/Strommix“. In diesem Transportsystem wird der Strom in verschiedenen Kraftwerken mit unterschiedlichen Energieträgern erzeugt. Gibt es in diesem Mix KWK-Anlagen, die parallel auch Wärme erzeugen, werden Treibhausgasemissionen und Energie anhand des Stromanteils zugeordnet („Energieallokation“).

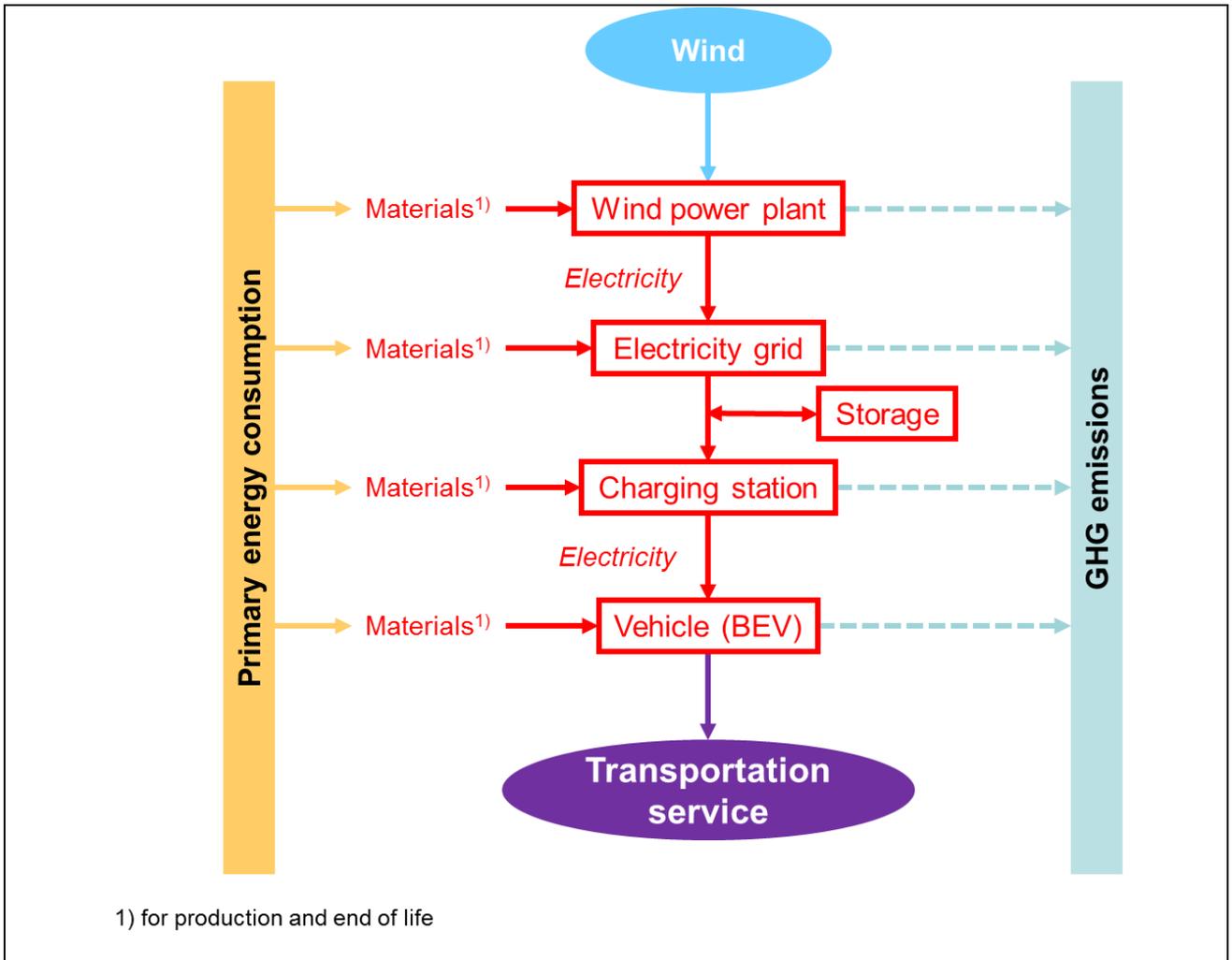


Abbildung 16: Prozesskette für „BEV_Strom/Wind/2019/2030/2050/EU-28“ (#32)

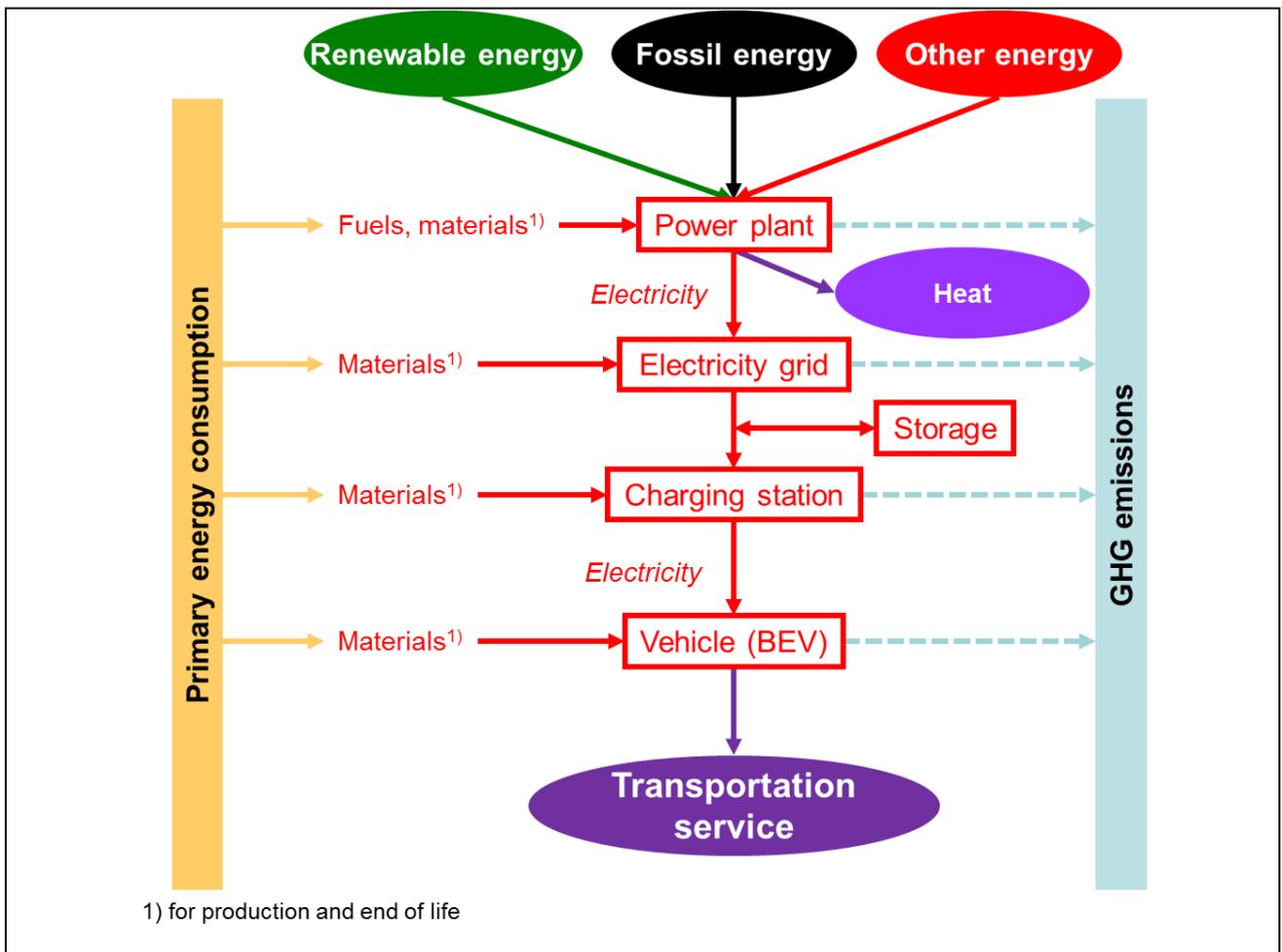


Abbildung 17: Prozesskette für „ICE_FAME/Biomasse/2019/2030/2050/EU-28“ (#30)

Abbildung 18 zeigt die Prozesskette für „PHEV_Benzin&Strom/Rohöl&Strommix“, bei der die Transportleistung durch ein PHEV bereitgestellt wird, das mit Benzin und Netzstrom betrieben wird. Diese Prozesskette ist somit eine Kombination aus dem Verkehrssystem mit einem Fahrzeug mit Ottomotor (Abbildung 13) und einem Batterie-Elektrofahrzeug (Abbildung 17).

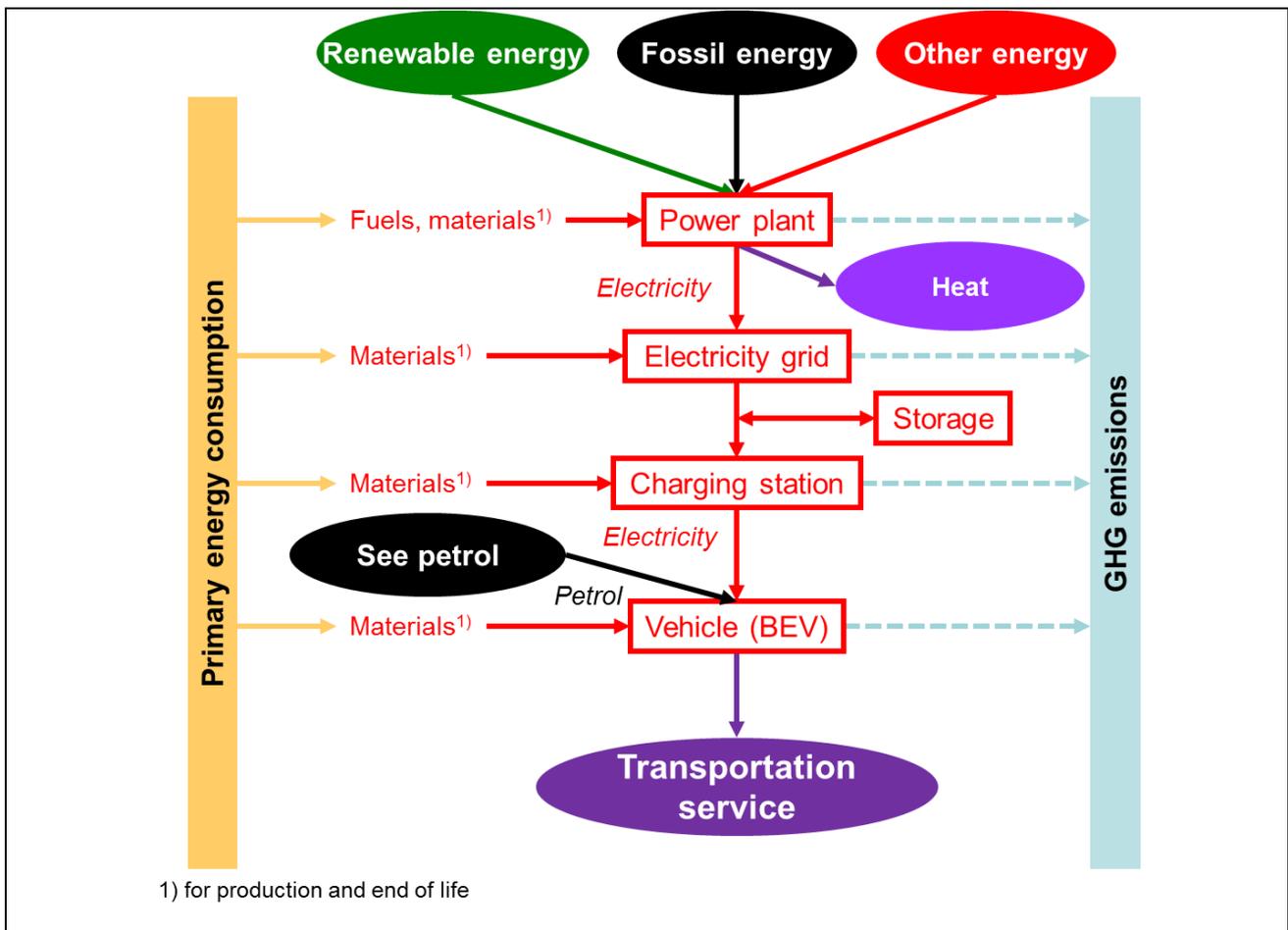


Abbildung 18: Prozesskette für „PHEV_Benzin&Strom/Rohöl&Strommix/2019/2030/2050/EU-28“ (#8)

Abbildung 19 zeigt die Prozesskette für „HFC_Wasserstoff/PV“. Die Prozesskette beginnt mit der Sonnenstrahlung in der Natur und endet mit der Erbringung einer Transportleistung durch ein Wasserstoffbrennstoffzellen-Fahrzeug. Die Sonne wird in einer PV-Anlage zur Erzeugung von erneuerbarem Strom genutzt, der dann über das Stromnetz zwecks Elektrolyse transportiert wird, wo Wasser in Wasserstoff und Sauerstoff gespalten wird. Sauerstoff und Wärme als Nebenprodukte der Elektrolyse können gegebenenfalls in der Zukunft genutzt werden. Der Wasserstoff wird gespeichert und per Lkw an die Tankstelle geliefert. Der gasförmige Wasserstoff wird in das Brennstoffzellen-Fahrzeug gefüllt, das die Transportleistung erbringt.

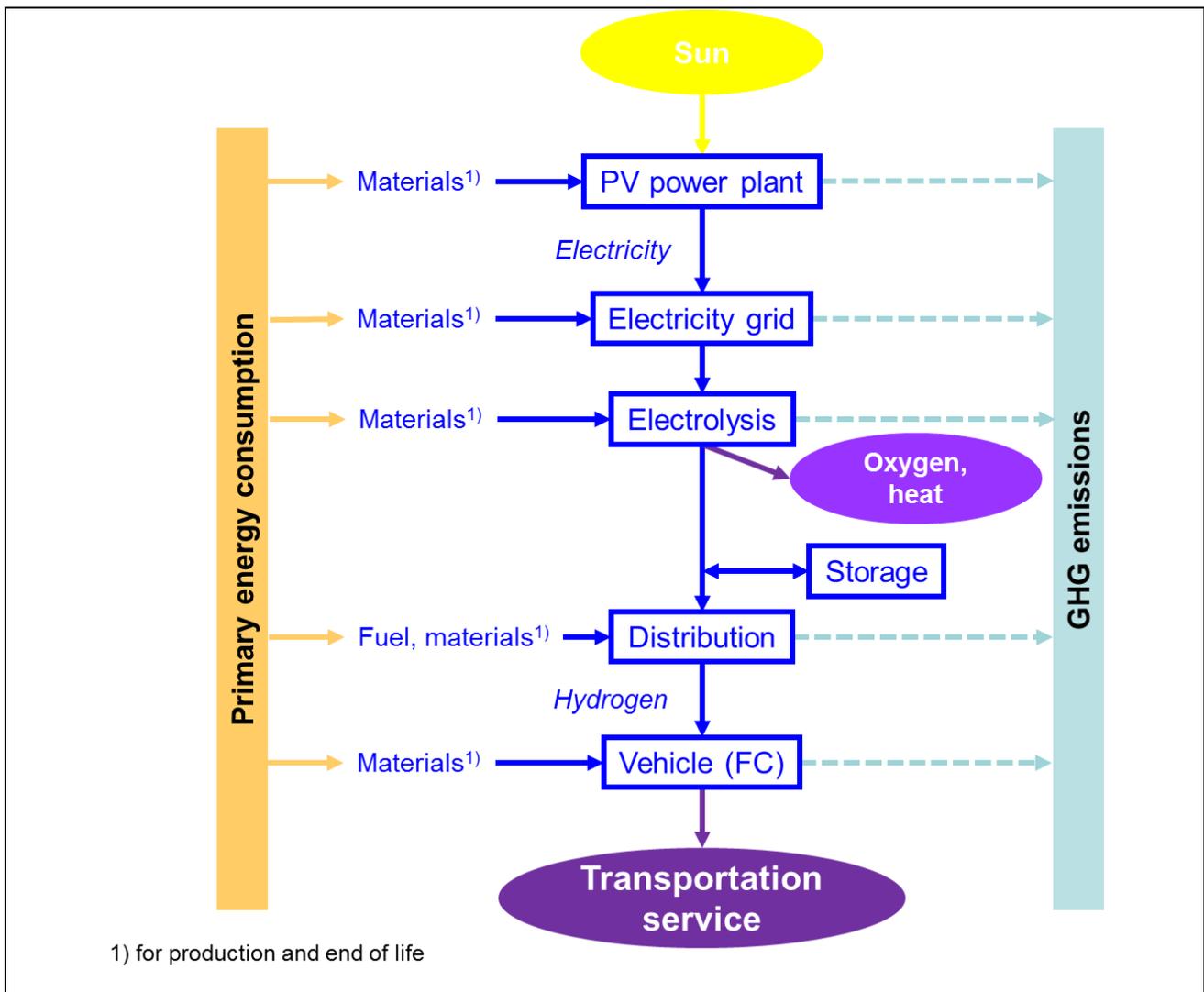


Abbildung 19: Prozesskette für „HFC_Wasserstoff/PV/2019/2030/2050/EU-28“ (#45)

Abbildung 20 zeigt die Prozesskette für „ICE_CRG/Stroh&Holz“. Die Prozesskette beginnt mit land- und forstwirtschaftlichen Nutzflächen. Sie endet mit der Erbringung einer Transportleistung. Stroh wird nach der Getreideernte gesammelt; ebenso wird mit Forstwirtschaftsabfällen nach der Ernte von Rund- und Industrieholz verfahren. Holz und Stroh werden dann zur CRG-Anlage transportiert, wo eine thermische Vergasung zu Methan stattfindet, das dann komprimiert wird. Dabei wird Wärme produziert, und die Emissionen werden anhand der Methan- und Wärmemenge zugeordnet („Energieallokation“). Das CRG wird über das (Erdgas-)Netz zur Tankstelle transportiert, wo es zum Betanken des Fahrzeugs verwendet wird, das die Transportleistung mit einem Verbrennungsmotor bereitstellt.

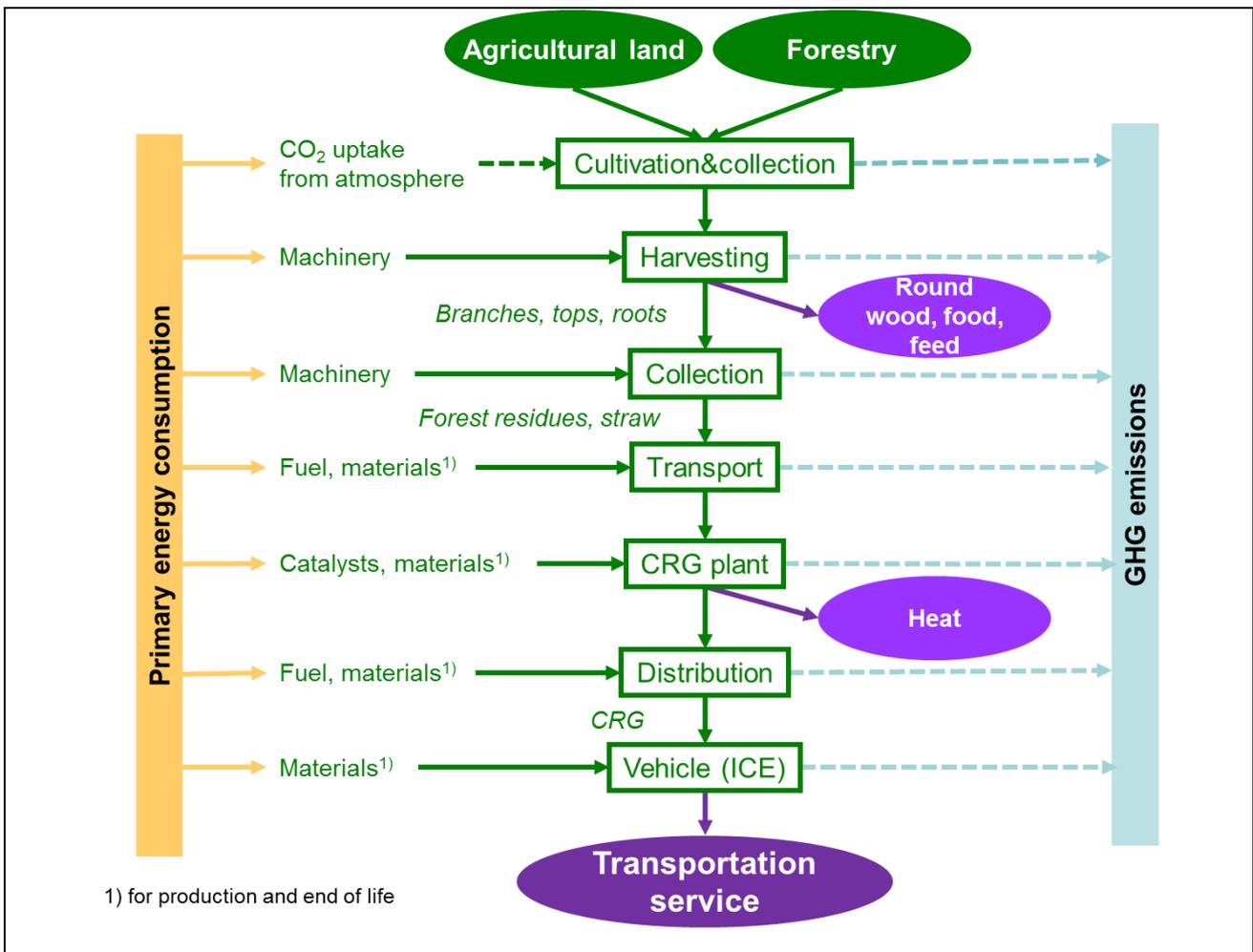


Abbildung 20: Prozesskette für „ICE_CRG/Stroh&Holz/2019/2030/2050/EU-28“ (#52)

Abbildung 21 zeigt die Prozesskette für „ICE_E-Fuel FT-Diesel/H2 Wind&CO2 Luft“. Die Prozesskette beginnt mit der Windkraft in der Natur und endet mit der Erbringung einer Transportleistung durch ein Verbrennerfahrzeug. Die Windkraftanlage produziert erneuerbaren Strom, der zwecks Elektrolyse transportiert wird, wo Wasser in Wasserstoff und Sauerstoff gespalten wird. Der Sauerstoff und die Wärme als Nebenprodukte der Elektrolyse können gegebenenfalls in der Zukunft genutzt werden, was aber in den vorliegenden Analysen unberücksichtigt bleibt. Der Wasserstoff wird in der FT-Anlage zur Herstellung von FT-Diesel eingesetzt, der dem herkömmlichen fossilen Diesel ähnlich ist. Allerdings stammt der Kohlenstoff hier aus dem CO₂ in der Luft. In der CO₂-Anlage wird das CO₂ aus der Atmosphäre abgetrennt, konzentriert und dann in der FT-Anlage zur Herstellung des E-Fuels FT-Diesel verwendet. Die CO₂-

Anlage nutzt auch Strom aus Windkraft. Die Wärme aus der FT-Anlage kann für Fernwärme genutzt werden, was in der Analyse berücksichtigt wird (siehe Anhang I). Der FT-Diesel wird per Lkw an die Tankstelle geliefert, wo er zum Betanken des Fahrzeugs verwendet wird, das die Transportleistung mit einem Verbrennungsmotor bereitstellt.

Abbildung 22 zeigt die Prozesskette für „ICE_E-Fuel FT-Diesel/Strommix&CO2 Biomasse“, bei der die Transportleistung durch ein mit FT-Diesel betriebenes Verbrennerfahrzeug bereitgestellt wird. Diese Prozesskette ist somit eine Kombination des Verkehrssystems mit FT-Diesel aus Biomasse (wie Abbildung 20, aber mit FT-Diesel statt CRG) und aus Strom und CO₂ aus der Luft, wobei das CO₂ in diesem Fall aus der Biomasse-Vergasung stammt (Abbildung 21).

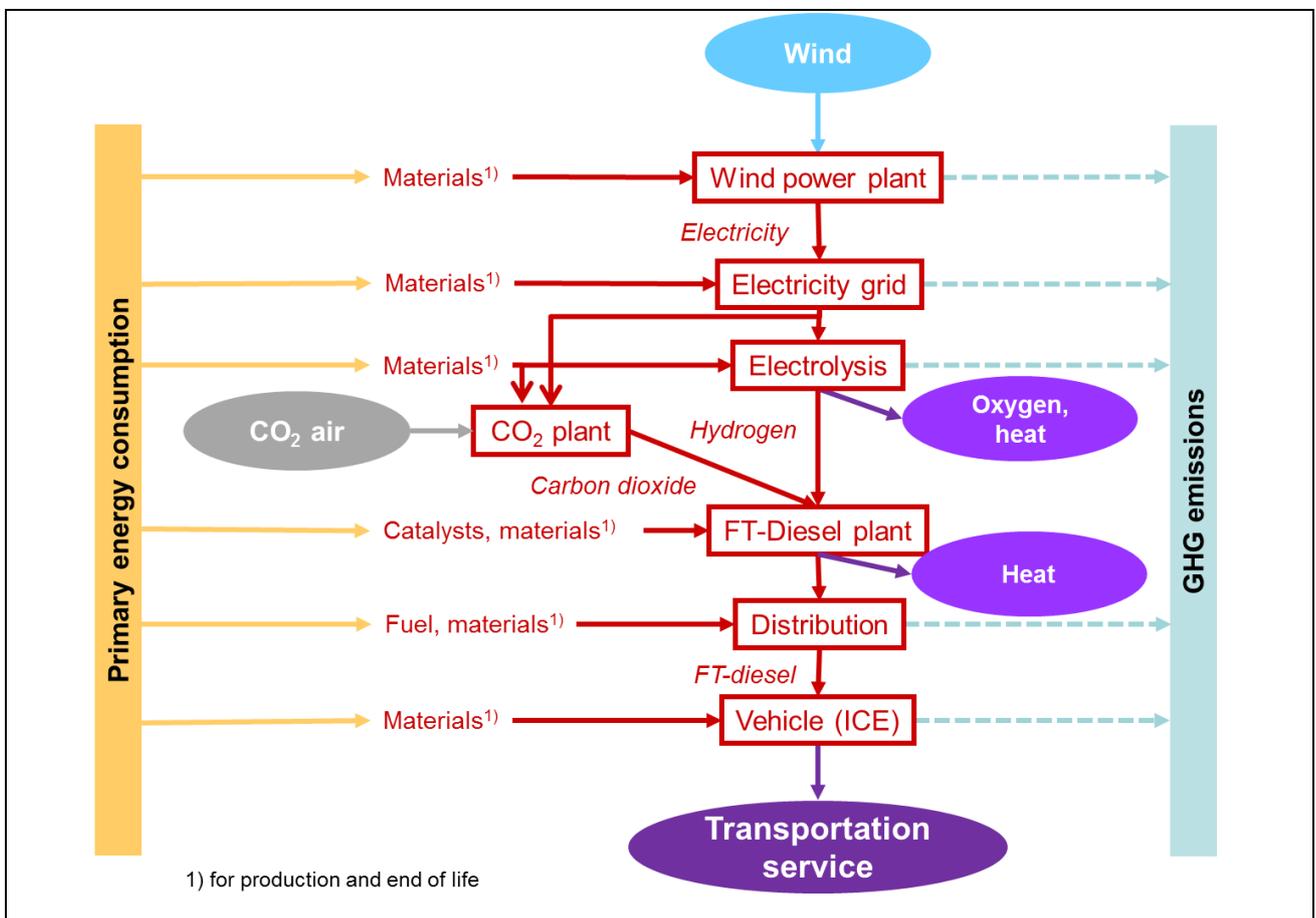


Abbildung 21: Prozesskette für „ICE_E-Fuel FT-Diesel/H2 Wind&CO2 Luft/2019/2030/2050/EU-28“ (#53)

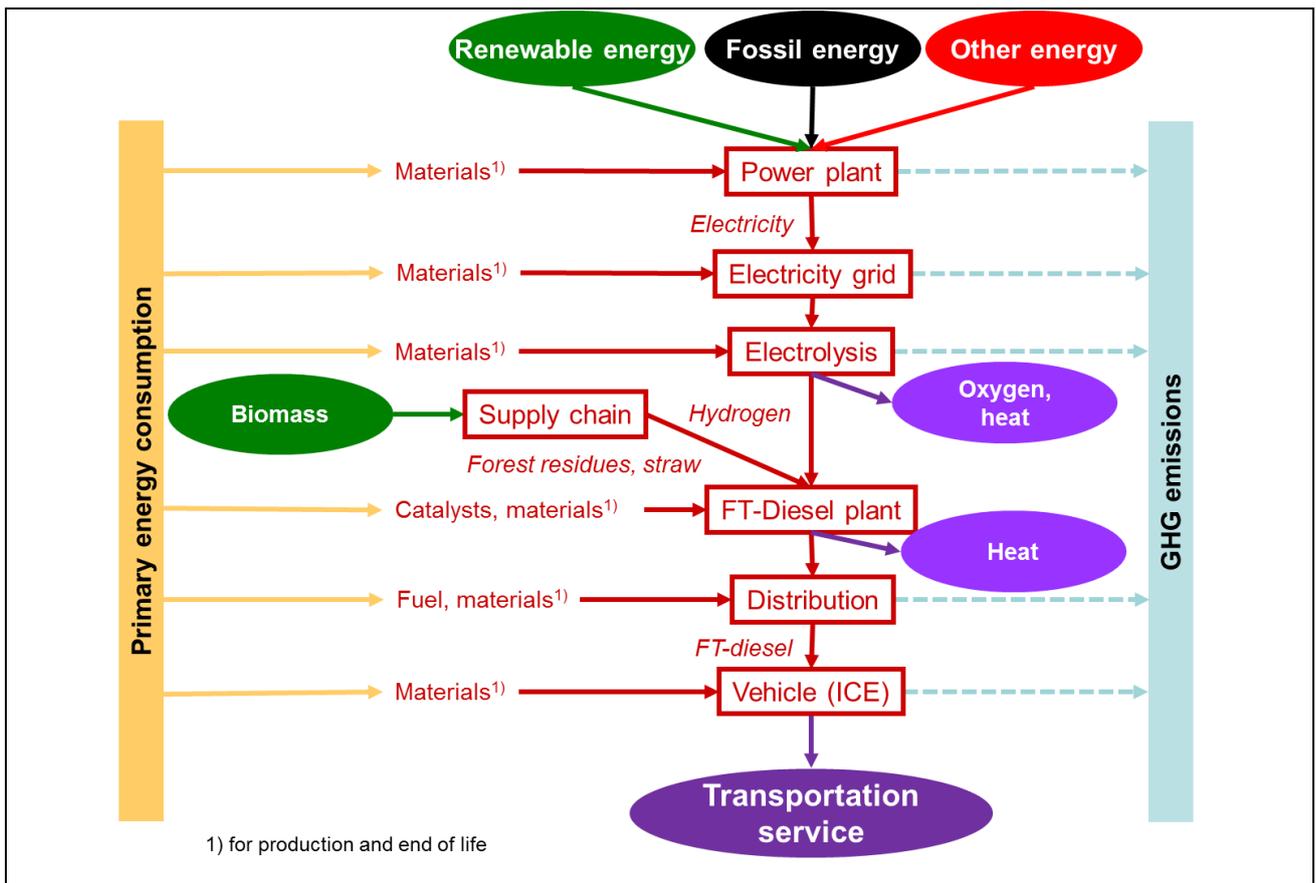


Abbildung 22: Prozesskette für „ICE_E-Fuel FT-Diesel/Strommix&CO2 Biomasse/2019/2030/2050/EU-28“ (#61)

5. Datenbank

5.1 Datenstruktur

Grundsätzlich werden in der LCA Daten verwendet, die die technischen, geografischen und zeitlichen Rahmenbedingungen angemessen darstellen, um Ziel und Umfang dieser LCA-basierten Schätzung von Treibhausgasemissionen und kumuliertem Primärenergieaufwand zu erreichen. Da in den Analysen und im LCA-Tool die verschiedenen Verkehrssysteme und der unterschiedliche Stand der Technik (2019/2030/2050) verglichen werden, besteht der wichtigste Aspekt der Basisdaten darin, die wesentlichen Unterschiede (z.B. Kraftstoffverbrauch pro km) zwischen den Systemen und dem Stand der Technik widerzuspiegeln, um die wichtigsten Unterschiede zwischen den Treibhausgasemissionen und dem Primärenergieaufwand zu identifizieren. Der Schwerpunkt der Datenerhebung und -auswahl liegt daher auf den Haupteinflüssen, die sich stark auf die

geschätzten Treibhausgasemissionen und den geschätzten Primärenergieaufwand insgesamt auswirken.

Ausgehend davon werden in der LCA zwei verschiedene Arten von Datenkategorien erstellt (siehe beispielsweise Abbildung 23):

- Vordergrunddaten und
- Hintergrunddaten.

Die Vordergrunddaten, die einen wesentlichen Einfluss auf die gesamten Umweltauswirkungen, die Unterschiede zwischen den betrachteten Verkehrssystemen und den Stand der Technik haben, müssen entsprechend dem Ziel und dem Umfang der LCA explizit erfasst, bewertet und dokumentiert werden. Basierend auf unterschiedlichen schriftlichen Quellen sind die Zukunftstrends auch eigene Annahmen, die auf fachlicher Beurteilung und Harmonisierung im Rahmen der Stakeholder-Einbindung basieren. Beispiele für typische Vordergrunddaten für die LCA sind

- Fahrzeug: z. B. Gewicht, Energieverbrauch, Lebensdauer
- Art der Biomasse für Biokraftstoffe
- Stromquelle/-mix für Elektrofahrzeuge

Die Hintergrunddaten, die nur einen geringen Einfluss auf den Unterschied zwischen den betrachteten Umweltauswirkungen der verglichenen Verkehrssysteme haben, z. B. die Umweltauswirkungen von Stahl, werden aus geeigneten Datenbanken (z.B. GEMIS 2019, ecoinvent 2019) entnommen und dokumentiert. Typische Hintergrunddaten für die LCA beziehen sich auf

- Den Strommix für Hilfsprozesse
- Produktionsmaterialien für Fahrzeuge
- Hilfsstoffe und Energie für Prozesse
- Verteilungsinfrastruktur

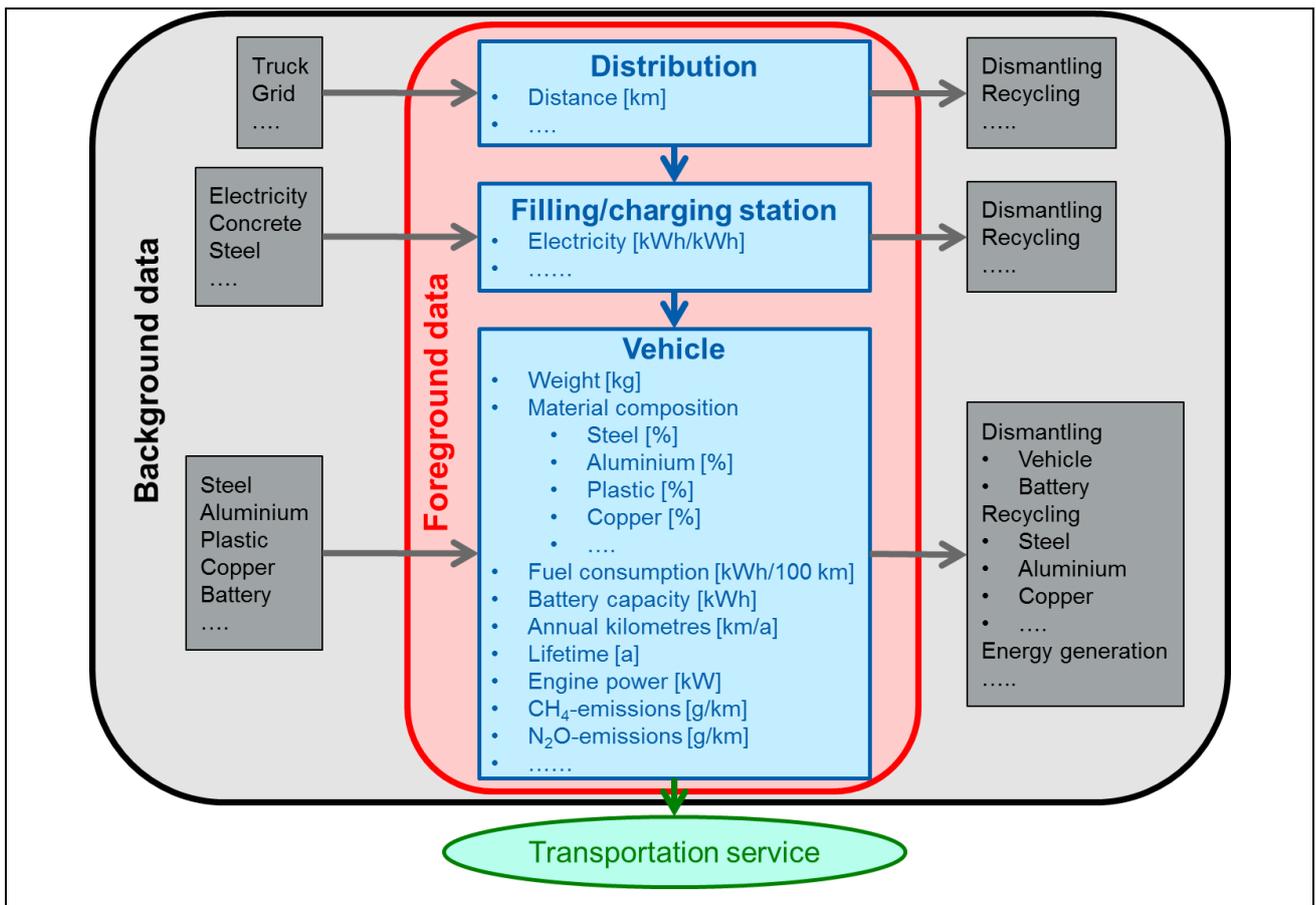


Abbildung 23: Beispiele für Vordergrunddaten („Fahrzeug“, „Tankstelle und Ladestation“, „Verteilung“) und Hintergrunddaten („Material- und Komponentenproduktion“, „Demontage, Recycling und Energieerzeugung“)

Zu Beginn der LCA ist nicht ganz klar, welche Daten explizit Vordergrund- und welche Hintergrunddaten sind, z. B. die Ladeinfrastruktur für Elektrofahrzeuge. Die Identifizierung aller Vordergrunddaten basiert einerseits auf den langjährigen Erfahrungen mit der LCA und andererseits auf einer Iteration bei der Berechnung der LCA nach ISO 14040 (siehe [Abbildung 2](#)). Zu diesem Zweck werden auch relevante Inputs und Abklärungen aus dem kontinuierlichen Stakeholderprozess (siehe Kapitel 3.7) sowie Anforderungen aus der zukünftigen Nutzung des TOOL verwendet, um die Vordergrunddaten endgültig explizit festzulegen.

Alle Basisdaten werden dokumentiert und in das LCA TOOL integriert, und die relevantesten Daten werden auch im Bericht angegeben. Die Vordergrunddaten werden mit den Stakeholdern erörtert. Darüber hinaus wurden bestehende Studien, die für die Stakeholder (z. B. FIA, ÖAMTC, ADAC) als relevant identifiziert wurden, bei der Quantifizierung, Bewertung oder Validierung der Vordergrunddaten (z. B. ITF) berücksichtigt.

Alle Vordergrunddaten lassen sich durch den Nutzer des TOOL ändern. Für alle Vordergrunddaten werden jedoch Standardwerte bereitgestellt und berichtet.

5.2 Zukünftige Entwicklungen

Alle Daten werden für den aktuellen Stand der Technik (2019) und den möglichen zukünftigen Stand der Technik der Jahre 2030 und 2050 bereitgestellt.

Da die zukünftige Technologieentwicklung nicht wissenschaftlich analysiert und bewertet werden kann, basieren die bereitgestellten Standarddaten auf einer fachlichen Einschätzung unter Berücksichtigung der folgenden Überlegungen:

- Die Zukunftsdaten geben eine mögliche Richtung für zukünftige Entwicklungen vor und sind Schätzungen für einzelne Daten, die dies widerspiegeln.
- Die Zukunftsdaten werden verwendet, um den Bereich der möglichen zukünftigen Treibhausgasemissionen und des kumulierten Primärenergieaufwands der Verkehrssysteme abzuschätzen und aufzuzeigen, wie sich eine erwartete technologische Entwicklung, z. B. verbesserter Energieverbrauch eines Fahrzeugs, auf Treibhausgasemissionen und kumulierten Primärenergieaufwand auswirkt.
- Neben der erfolgreichen laufenden Technologieentwicklung ist die Leistungsfähigkeit der Zukunftstechnologie auch abhängig vom Zeitpunkt der breiten Markteinführung, von der Entwicklung der zukünftigen Mobilitätsnachfrage, vom Gesamtenergieaufwand, von der wirtschaftlichen Entwicklung und der politischen Situation mit ihren möglichen neuen Gesetzgebungen (z. B. Pariser Klimaziele).
- Die folgenden drei wesentlichen technologischen Entwicklungen sind in der Zukunft zu erwarten:
 - Verbesserung der Energieeffizienz in allen Umwandlungs- und Produktionsprozessen.
 - Steigerung des Anteils der erneuerbaren Energien, die in allen Produktionsprozessen genutzt werden.
 - Breite kommerzielle Einführung und Implementierung von Technologien, die derzeit im Pilot- oder Demonstrationsmaßstab entwickelt werden, wie z. B.

- Wasserstoffbrennstoffzellen-Fahrzeuge (HFCV):
 - Lignocellulose-Rohstoffe (z. B. Holz und Stroh) für fortgeschrittene Biokraftstoffe, z. B. FT-Diesel
 - E-Fuels aus einer Kohlenstoffquelle (z. B. Biomasse, CO₂ aus der Atmosphäre) und (erneuerbarem) Strom für flüssige und gasförmige kohlenstoffhaltige Kraftstoffe
 - Intelligente Stromnetze, Sektorenkopplung, neue Stromspeichersysteme, z. B. Nutzung von fluktuierendem Strom aus der PV zum Laden eines Batterie-Elektrofahrzeugs
- Die Option Fahrzeug zu Netz für Elektrofahrzeuge zur Erbringung von Netzdienstleistungen und autonom fahrende Fahrzeuge (mit ihrer zusätzlich erforderlichen Infrastruktur) sind in den Schätzungen der zukünftigen technologischen Entwicklungen nicht berücksichtigt.

Eine Hauptquelle für diese Schätzung der zukünftigen Technologieentwicklung war „*The EU Reference Scenario 2016: Energy, transport and GHG emissions – Trends to 2050*“ (EU-2018) (Webseite: <https://ec.europa.eu/energy/en/data-analysis/energy-modelling>). Die relevantesten Daten dieses Szenarios zeigt Tabelle 7.

Tabelle 7: Identifizierte Hauptdaten zur Technologieentwicklung und -implementierung in Europa (EU-2018)

	EU28				Austria				Germany				Italy				Poland				Portugal				Spain				United Kingdom			
	2015	2020	2030	2050	2015	2020	2030	2050	2015	2020	2030	2050	2015	2020	2030	2050	2015	2020	2030	2050	2015	2020	2030	2050	2015	2020	2030	2050	2015	2020	2030	2050
Gross Electricity generation by source (T) (GWh)	3,251,309	3,357,685	3,527,528	4,063,737	59,617.65	71,620.63	79,932.76	90,574.55	-48,203	1,942	15,833	14,973	288,972	316,523	323,149	417,853	162,367	176,244	203,166	245,347	50,199	48,507	48,243	52,086	275,295.3	282,996.3	287,052.2	328,449.0	357,131	369,460	398,021	497,924
Nuclear energy	25.8%	23.0%	22.0%	18.1%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	16.2%	5.8%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	28.2%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	20.5%	20.5%	20.0%	0.0%	17.5%	17.0%	26.9%	29.1%
Solids	25.2%	22.9%	16.0%	6.2%	5.9%	6.9%	4.1%	0.0%	45.5%	45.7%	38.0%	21.1%	18.6%	21.2%	13.8%	0.0%	78.1%	80.1%	65.0%	25.9%	30.6%	7.3%	0.0%	0.0%	20.4%	19.9%	5.3%	0.2%	26.1%	7.2%	0.9%	0.7%
Oil (including refinery gas)	1.0%	0.7%	0.5%	0.1%	0.3%	0.3%	0.1%	0.0%	0.2%	0.2%	0.5%	0.1%	2.8%	2.5%	2.4%	0.2%	0.0%	0.0%	0.2%	0.1%	1.6%	4.1%	2.7%	0.9%	1.8%	0.2%	0.6%	0.5%	1.2%	0.9%	0.7%	0.1%
Gas (including derived gases)	16.9%	17.3%	18.6%	20.6%	9.5%	19.7%	18.3%	19.3%	15.5%	12.5%	17.8%	19.3%	34.8%	39.9%	37.9%	34.4%	1.7%	5.5%	14.9%	17.0%	19.6%	17.8%	10.7%	2.6%	18.8%	19.9%	17.4%	13.5%	31.8%	31.3%	27.2%	29.7%
Biomass-waste	5.6%	6.3%	8.0%	9.6%	3.6%	4.9%	5.1%	7.5%	9.8%	5.7%	8.7%	11.6%	5.9%	6.8%	7.9%	15.2%	5.5%	6.5%	7.8%	8.5%	6.1%	6.3%	6.0%	7.7%	1.6%	2.1%	3.1%	3.8%	7.1%	13.8%	16.6%	11.1%
Hydro (pumping excluded)	10.8%	11.2%	10.7%	10.4%	57.3%	60.3%	55.7%	50.5%	3.7%	3.8%	3.9%	4.7%	15.2%	15.0%	15.4%	12.9%	1.4%	1.4%	1.4%	1.8%	19.7%	38.2%	39.1%	36.7%	11.7%	11.8%	11.7%	10.6%	1.5%	1.5%	1.4%	1.1%
Wind	8.2%	13.8%	17.2%	24.1%	5.5%	6.2%	12.6%	17.0%	11.0%	18.3%	21.0%	30.2%	4.6%	4.6%	10.1%	14.8%	5.5%	6.5%	10.7%	18.3%	24.1%	24.3%	32.3%	36.9%	18.3%	19.9%	25.1%	38.9%	9.3%	25.8%	24.0%	26.2%
Solar	3.1%	4.6%	6.6%	10.5%	1.2%	1.6%	4.1%	5.6%	5.8%	8.1%	9.9%	12.8%	7.4%	8.1%	10.5%	21.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.1%	1.4%	1.6%	8.8%	14.7%	4.3%	5.7%	16.8%	32.6%	2.1%	2.4%	2.3%	1.9%
Geothermal and other renewables	0.2%	0.3%	0.3%	0.4%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.2%	0.2%	0.1%	2.0%	2.0%	1.9%	1.4%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.4%	0.4%	0.4%	0.4%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.1%	0.1%	0.1%
Net import	20,481	17,460	2,037	-247	12,339	5,110	3,261	2,392	-48,203	1,942	15,833	14,973	45,981	29,983	30,755	19,499	70.4	735.2	1356.6	1479.1	2,265	5,240	5,138	3,939	-1,327	4,415	4,671	-4,374	18,380	15,594	12,362	5,480
	0.6%	0.5%	0.1%	0.0%	20.7%	7.1%	4.3%	3.0%	-7.5%	0.3%	2.6%	2.5%	15.9%	9.5%	9.8%	6.0%	0.0%	0.4%	0.7%	0.7%	4.5%	10.8%	10.7%	8.2%	-0.5%	1.6%	1.7%	-1.5%	5.1%	4.2%	3.3%	1.4%
Power plants																																
Efficiency of gross thermal power generation	40.2%	40.4%	42.2%	49.7%	40%	44%	39%	45%	41%	38%	42%	47%	45%	46%	47%	55%	35%	37%	39%	43%	42%	44%	39%	36%	43%	43%	44%	53%	41%	45%	47%	61%
% of gross electricity from CHP	12.2%	10.2%	11.8%	13.1%	18%	23%	18%	23%	13%	6%	14%	15%	15%	15%	11%	7%	18%	21%	19%	24%	17%	23%	19%	11%	10%	5%	6%	8%	5%	5%	5%	4%
% of electricity from CCS	0.0%	0.2%	0.2%	4.8%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	13%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	21%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	1%	2%	1%
% of carbon free (RES, nuclear) gross electricity generation	55.5%	59.2%	64.9%	73.1%	81%	73%	78%	81%	43%	42%	44%	60%	38%	36%	46%	65%	13%	14%	20%	57%	50%	71%	87%	96%	58%	60%	77%	86%	39%	61%	71%	70%
Energy efficiency																																
Primary energy	1,559,892	1,526,914	1,436,069	1,367,462	30,896	31,154	30,293	29,517	297,924	282,452	251,687	229,575	151,986	153,883	142,394	136,887	96,389	98,982	99,307	101,337	21,514	19,893	18,515	17,354	118,838	118,764	108,350	97,112	191,181	176,613	168,127	169,699
Final Energy Demand	1,133,457	1,133,797	1,081,368	1,085,865	28,425	28,027	27,082	26,942	217,308	212,550	197,367	185,668	122,385	122,484	115,857	116,607	68,144	71,659	72,935	74,647	16,789	16,831	16,266	15,574	85,314	86,213	83,134	85,940	138,484	135,118	126,704	131,825
Change primary energy	2.2%	0.0%	-5.9%	-10.4%	-1%	0%	-3%	-5%	5%	0%	-11%	-19%	-1%	0%	-7%	-11%	-3%	0%	0%	2%	8%	0%	-7%	-13%	0%	0%	-9%	-18%	8%	0%	-5%	-4%
Change final energy	0.0%	0.0%	-4.6%	-4.2%	1%	0%	-3%	-4%	2%	0%	-7%	-13%	0%	0%	-5%	-5%	-5%	0%	2%	4%	0%	0%	-3%	-7%	-1%	0%	-4%	0%	2%	0%	-6%	-2%
Energy intensity indicators																																
Gross HI. Cons./GDP (toe/M€13)	154	113	93	66	113	97	82	59	144	104	86	66	111	96	79	57	350	214	171	138	150	114	92	73	139	103	79	56	150	88	73	50
Industry (Energy on Value added, index 2000=100)	100	75	62	47	100	104	89	68	100	90	77	61	100	78	62	49	100	32	25	18	100	83	67	52	100	83	67	50	100	68	52	39
Residential (Energy on Private Income, index 2000=100)	100	79	66	48	100	76	63	44	100	75	64	51	100	114	99	70	100	66	51	40	100	85	73	60	100	93	72	57	100	68	58	42
Tertiary (Energy on Value added, index 2000=100)	100	83	69	51	100	76	66	49	100	76	64	49	100	113	97	75	100	76	61	48	100	85	70	59	100	100	76	61	100	66	56	38
Passenger transport (toe/Mpkm) (6)	39	30	25	21	47	37	31	27	42	28	23	19	33	26	23	20	32	34	28	24	48	37	32	27	47	34	29	25	38	29	24	20
Freight transport average (calculated)	33	30	28	25	30	41	36	31	27	20	18	16	35	33	31	29	22	34	29	27	36	31	28	26	44	39	36	34	46	42	39	36
Change 2020/2030/2050	88	68	57	43	82	72	67	46	86	65	55	44	80	77	65	50	117	76	61	49	89	73	60	50	88	76	60	47	89	60	50	37
			-17%	-24%			-15%	-24%			-16%	-21%			-15%	-23%			-20%	-19%			-17%	-18%			-21%	-21%			-16%	-26%
Share renewables																																
RES in Gross Final Energy Consumption (7) (in%)	7.5%	8.7%	12.4%	16.1%	24.6%	23.6%	30.5%	34.5%	3.6%	6.7%	10.5%	13.5%	4.7%	5.8%	10.5%	18.2%	6.5%	6.9%	9.2%	11.8%	19.1%	19.4%	24.3%	25.3%	8.1%	8.4%	13.8%	15.4%	0.9%	1.4%	3.3%	6.9%
RES-H&C share	9.0%	10.3%	14.0%	17.4%	20.4%	22.0%	29.7%	37.0%	4.2%	6.7%	9.6%	10.6%	2.9%	4.6%	10.4%	20.1%	9.6%	10.2%	11.6%	13.8%	30.4%	32.1%	33.9%	36.8%	11.0%	9.4%	12.6%	16.1%	0.8%	0.8%	1.8%	3.4%
RES-E share	13.3%	14.8%	19.7%	28.2%	66.9%	62.4%	65.7%	68.0%	6.1%	10.5%	18.1%	29.5%	15.7%	16.3%	20.1%	33.6%	1.6%	2.7%	6.6%	13.4%	28.3%	27.7%	40.7%	47.4%	16.6%	19.1%	29.8%	36.9%	2.6%	4.1%	7.4%	19.3%
RES-T share (based on ILUC formula)	0.9%	1.7%	5.2%	6.9%	6.8%	4.8%	10.9%	11.4%	0.8%	4.2%	6.9%	8.8%	0.6%	1.1%	5.0%	7.1%	0.2%	0.7%	6.1%	7.5%	0.4%	0.4%	5.7%	1.3%	0.6%	1.3%	5.1%	0.8%	0.1%	0.2%	3.0%	6.0%
average (calculated)	7.7%	8.9%	12.8%	17.2%	29.7%	28.2%	34.2%	37.7%	3.7%	7.0%	11.3%	15.6%	5.9%	6.9%	11.5%	19.7%	4.5%	5.1%	8.4%	11.6%	19.5%	19.9%	26.1%	27.7%	9.1%	9.6%	15.3%	17.3%	1.1%	1.6%	3.9%	8.9%
Change 2020/2030/2050			44%	34%			21%	10%			60%	38%			66%	72%			64%	38%			31%	6%			60%	13%			135%	131%

Unter Berücksichtigung dieser Überlegungen werden die folgenden Richtlinien für die fachliche Einschätzung des zukünftigen Standes der Technik für die Vordergrunddaten herangezogen:

- Fahrzeugtechnik (für alle Technologien)
 - Fahrzeuggewicht:
 - 2030: 0 % Reduktion gegenüber 2019
 - 2050: 30 % Reduktion gegenüber 2030
 - Energiebedarf Fahren:
 - 2030: 10 % Reduktion gegenüber 2019
 - 2050: 20 % Reduktion gegenüber 2030
 - Energiebedarf Heizung und Kühlung:
 - 2030: 10 % Reduktion gegenüber 2019
 - 2050: 10 % Reduktion gegenüber 2030
 - Energiebedarf für Hilfsstoffe im Fahrzeug: keine Veränderung
- Rohstoffmix für Biokraftstoffe:
 - Biodiesel (FAME – Fettsäuremethylester) und hydriertes Pflanzenöl (HVO): 2030 und 2050 unverändert gegenüber 2019
 - Bioethanol (EtOH):
 - 2030: 10 % aus Holz und Stroh mit entsprechender Verringerung anderer Rohstoffe
 - 2050: 25 % aus Holz und Stroh mit entsprechender Verringerung anderer Rohstoffe
 - Komprimiertes erneuerbares Gas (CRG) aus Biomasse-Vergasung

- 2030: 10 % aus Holz und Stroh mit entsprechender Verringerung anderer Rohstoffe
 - 2050: 25 % aus Holz und Stroh mit entsprechender Verringerung anderer Rohstoffe
 - Recycling von Fahrzeugen (außer Batterie): keine Veränderung
- Strommix
 - Europäische Länder, basierend auf Trends 2050 (siehe Tabelle 7)
 - Schweiz, basierend auf dem PSI-Bericht „Switzerland Energy Transition Scenarios – Development and Application of the Swiss TIMES Energy System Model (STEM)“ (PSI 2014)
 - Australien, basierend auf „Future Energy Scenario“ (National Grid 2018)
 - Kanada, basierend auf „Canada’s Energy Future 2018 – Energy Supply and Demand Projections 2040“ (National Energy Board 2018)

Die Schätzungen der Hintergrunddaten für die Jahre 2030 und 2050 sind in Kapitel 5.3.5 beschrieben und dargestellt.

5.3 Vordergrunddaten

Es sind drei Gruppen von Vordergrunddaten vorgegeben:

1. Fahrzeugspezifikation
2. Ressourcen zur Herstellung des Energieträgers für das Fahrzeug
3. Mögliche zukünftige Entwicklungen

5.3.1 Fahrzeugspezifikation

Die Vordergrunddaten für die Spezifikation des Fahrzeugs sind (weitere Details siehe auch Anhang I):

- Fahrzeugdaten (Tabelle 8, Tabelle 9 und Tabelle 10)
 - Gewicht [kg]

- Jährliche Fahrleistung [km/J]
- Lebensdauer [J]
 - Fahrzeug
 - Brennstoffzelle
 - Batterie
- Energieverbrauch [kWh/km] für
 - Fahrbetrieb
 - Heizung
 - Kühlung
 - Sonstiges
- Batterie und Ladung (Tabelle 11)
 - Kapazität [kWh]
 - Lebensdauer [J]
 - Anteil/Ladeart [%]
 - Langsames Laden
 - Schnellladen
 - Ladeverluste [%] (gemäß den Überlegungen in Kapitel 10.7)
 - Langsames Laden
 - Schnellladen
 - Standort der Batterieproduktion [%] (Ajanovic et al. 2018)
 - Asien
 - Europa
 - Amerika
 - Lebensende [%]
 - Materialrecycling
 - 2. Leben im stationären Betrieb

Tabelle 8: Vordergrunddaten für Fahrzeuge mit ICE, die fossile Kraftstoffe nutzen (für alle betrachteten Länder gleich) (JOANNEUM RESEARCH 2019)

Propulsion Fuel/energy	ICE petrol			ICE petrol E5			ICE petrol E10			ICE diesel			ICE diesel B7			ICE CNG		
	2019	2030	2050	2019	2030	2050	2019	2030	2050	2019	2030	2050	2019	2030	2050	2019	2030	2050
State of technology																		
Weight [kg]	1,180	1,180	820	1,180	1,180	820	1,180	1,180	820	1,260	1,260	880	1,260	1,260	880	1,190	1,190	830
Annual kilometres [km/a]	15,000	15,000	15,000	15,000	15,000	15,000	15,000	15,000	15,000	15,000	15,000	15,000	15,000	15,000	15,000	15,000	15,000	15,000
Lifetime [a]	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12
Battery																		
capacity [kWh]	1.3	1.6	2.0	1.3	1.6	2.0	1.3	1.6	2.0	1.3	1.6	2.0	1.3	1.6	2.0	1.3	1.6	2.0
lifetime [a]	8.0	12.0	12.0	8.0	12.0	12.0	8.0	12.0	12.0	8.0	12.0	12.0	8.0	12.0	12.0	8.0	12.0	12.0
weight [kg]	25	29	33	25	29	33	25	29	33	25	29	33	25	29	33	25	29	33
Energy consumption																		
driving [kWh/100 km]	0.54	0.49	0.39	0.54	0.49	0.39	0.54	0.49	0.39	0.44	0.40	0.32	0.44	0.40	0.32	0.55	0.50	0.40
heating [kWh/100 km]	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
cooling [kWh/100 km]	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02
other [kWh/100 km]	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06
total [kWh/100 km]	0.62	0.56	0.47	0.62	0.56	0.47	0.62	0.56	0.47	0.52	0.47	0.39	0.52	0.47	0.39	0.63	0.57	0.47
Emissions																		
CO ₂ [g/km]	164	149	123	159	145	119	154	140	116	137	125	103	128	117	97	127	116	95
CH ₄ [mg/km]	0.7	0.7	0.6	0.7	0.7	0.6	0.7	0.7	0.6	0.2	0.1	0.1	0.2	0.1	0.1	16.1	14.7	12.1
N ₂ O [mg/km]	0.4	0.4	0.3	0.4	0.4	0.3	0.4	0.4	0.3	4.7	4.3	3.5	4.7	4.3	3.5	0.4	0.4	0.3
CO ₂ -eq [g/km]	164	150	123	159	145	119	154	140	116	138	126	104	130	118	98	128	116	96

Tabelle 9: Vordergrunddaten für Fahrzeuge mit ICE, die erneuerbare Kraftstoffe nutzen (für alle betrachteten Länder gleich) (JOANNEUM RESEARCH 2019)

Propulsion Fuel/energy	ICE CNG CRG5			ICE FAME			ICE HVO			ICE EtOH			ICE FT-diesel			ICE CRG		
	2019	2030	2050	2019	2030	2050	2019	2030	2050	2019	2030	2050	2019	2030	2050	2019	2030	2050
State of technology																		
Weight [kg]	1,190	1,190	830	1,260	1,260	880	1,260	1,260	880	1,180	1,180	820	1,260	1,260	880	1,190	1,190	830
Annual kilometres [km/a]	15,000	15,000	15,000	15,000	15,000	15,000	15,000	15,000	15,000	15,000	15,000	15,000	15,000	15,000	15,000	15,000	15,000	15,000
Lifetime [a]	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12
Battery																		
capacity [kWh]	1.3	1.6	2.0	1.3	1.6	2.0	1.3	1.6	2.0	1.3	1.6	2.0	1.3	1.6	2.0	1.3	1.6	2.0
lifetime [a]	8.0	12.0	12.0	8.0	12.0	12.0	8.0	12.0	12.0	8.0	12.0	12.0	8.0	12.0	12.0	8.0	12.0	12.0
weight [kg]	25	29	33	25	29	33	25	29	33	25	29	33	25	29	33	25	29	33
Energy consumption																		
driving [kWh/100 km]	0.55	0.50	0.40	0.44	0.40	0.32	0.44	0.40	0.32	0.54	0.49	0.39	0.44	0.40	0.32	0.55	0.50	0.40
heating [kWh/100 km]	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
cooling [kWh/100 km]	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02
other [kWh/100 km]	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06
total [kWh/100 km]	0.63	0.57	0.47	0.52	0.47	0.39	0.52	0.47	0.39	0.62	0.56	0.47	0.52	0.47	0.39	0.63	0.57	0.47
Emissions																		
CO ₂ [g/km]	121	110	90	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
CH ₄ [mg/km]	16.1	14.7	12.1	0.1	0.1	0.1	0.2	0.1	0.1	0.7	0.7	0.6	0.2	0.1	0.1	16.1	14.7	12.1
N ₂ O [mg/km]	0.4	0.4	0.3	5.6	5.1	4.2	4.7	4.3	3.5	0.4	0.4	0.3	4.7	4.3	3.5	0.4	0.4	0.3
CO ₂ -eq [g/km]	121	110	91	1.7	1.5	1.3	1.4	1.3	1.1	0.2	0.1	0.1	1.4	1.3	1.1	0.7	0.6	0.5

Tabelle 10: Vordergrunddaten für PHEV, BEV und FCHV (für alle betrachteten Länder gleich) (JOANNEUM RESEARCH 2019)

Propulsion Fuel/energy	PHEV petrol&el			PHEV diesel&el			BEV electr.			FCHV hydrogen		
	2019	2030	2050	2019	2030	2050	2019	2030	2050	2019	2030	2050
State of technology												
Weight [kg]	1.400	1.400	980	1.480	1.480	1.040	1.430	1.430	1.000	1.390	1.390	970
Annual kilon [km/a]	15.000	15.000	15.000	15.000	15.000	15.000	15.000	15.000	15.000	15.000	15.000	15.000
Lifetime [a]	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12
Battery												
capacity [kWh]	10	12	15	10	12	15	35	45	60	1.3	2.0	5.0
lifetime [a]	8	12	12	8	12	12	8	12	12	8	12	12
weight [kg]	124	136	155	124	136	155	318	372	451	16	23	52
Energy consumption												
driving [kWh/100 km]	0.29	0.26	0.21	0.26	0.23	0.19	0.09	0.08	0.06	0.24	0.22	0.06
heating [kWh/100 km]	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02
cooling [kWh/100 km]	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02
other [kWh/100 km]	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06
total [kWh/100 km]	0.37	0.34	0.29	0.34	0.31	0.26	0.19	0.18	0.16	0.34	0.31	0.16
id electricity [kWh/100 km]	0.11	0.10	0.08	0.11	0.10	0.08	0.19	0.18	0.16	-	-	-
fuel [kWh/100 km]	0.26	0.24	0.20	0.23	0.21	0.18	-	-	-	-	-	-
Emissions												
CO2 [g/km]	75	69	58	66	61	52	0	0	0	0	0	0
CH4 [mg/km]	0.6	0.5	0.5	0.1	0.1	0.1	0	0	0	0	0	0
N2O [mg/km]	0.3	0.3	0.2	2.8	2.6	2.2	0	0	0	0	0	0
CO2-eq [g/km]	75	69	58	128	118	101	0	0	0	0	0	0

Tabelle 11: Vordergrunddaten zu Batterieproduktion, -ladung und -ende (eigene Annahmen und Standort der Batterieproduktion nach Ajanovic et al. 2018)

State of technology	2019	2030	2050
Share of charging type			
Slow charging (of km/a)	90%	70%	60%
Quick charging (of km/a)	10%	30%	40%
Charging losses			
slow charging	10%	8%	6%
quick charging	20%	16%	12%
Location of battery production			
Asia	75%	60%	45%
Europe	6%	15%	25%
America	19%	25%	30%
End of life			
recycling rate	97%	95%	95%
2nd stationary life	3%	5%	5%

5.3.2 Fossile Ressourcen

Die Vordergrunddaten für die fossilen Ressourcen zur Herstellung des Energieträgers für das Fahrzeug sind:

- Anteil fossiler Ressourcen (Tabelle 12)
 - Öl
 - Herkömmliches Rohöl
 - Ölsande
 - Erdgas
 - Herkömmliches Erdgas
 - Erdgas aus Fracking

Tabelle 12: Vordergrunddaten für den Anteil fossiler Ressourcen bei Öl und Gas (eigene Annahmen)

Share of fossil resources		2019	2030	2050
Oil				
	oil sand	0%	2%	20%
	conventional	100%	98%	80%
Natural gas				
	fracking	0%	2%	20%
	conventional	100%	98%	80%

5.3.3 Biomasse-Ressourcen

Die Vordergrunddaten für die biogenen Ressourcen zur Herstellung und Bereitstellung des Energieträgers für das Fahrzeug sind:

- Landnutzungsänderung (LUC) (Tabelle 13), wobei als Standardwert eine Landnutzungsänderung von 10 % angenommen wird
 - Von Grünland zu Zuckerrohr
 - Von Grünland zu Sojabohnen
 - Von Regenwald zu Palmöl
- Anteil der Biokraftstoff-Beimischung
 - Biodiesel (FAME) in Diesel: 7 Vol.-%
 - HVO in Diesel: 0 Vol.-%
 - FT-Diesel in Diesel: 0 Vol.-%
 - Bioethanol (EtOH) in Benzin: 5 Vol.-%
 - Biomethan (CRG) in komprimiertem Erdgas (CNG): 5 Vol.-%
- Biomassemix (Tabelle 14) (EUA 2018, UFOP 2018, ePURE 2018 und eigene Annahmen)
 - FAME
 - Rapsöl
 - Speiseöl und Tierfette
 - Palmöl

- Sojaöl
- HVO
 - Rapsöl
 - Speiseöl und Tierfette
 - Palmöl
 - Sojaöl
- EtOH
 - Weizen und Mais
 - Zuckerrüben
 - Zuckerrohr
 - Holz
 - Stroh
- FT-Diesel
 - Holz
 - Stroh
- CRG aus Vergasung
 - Holz
 - Stroh
- CRG aus Biogas durch Fermentation
 - Mais und Dung
 - Abfälle

Table 13: Vordergrunddaten für Landnutzungsänderung bei Biokraftstoffen (eigene Annahmen)

Share of direct land use change (LUC) for biofuels	2019	2030	2050
	sugar cane (from pasture)	10%	10%
soja beans (from pasture)	10%	10%	10%
palm oil (from trop. forest)	10%	10%	10%

Table 14: Vordergrunddaten für Biomassemix bei Biokraftstoffen (EUA 2018, UFOP 2018, ePURE 2018 und eigene Annahmen)

Country		EU28		
		2019	2030	2050
FAME				
	rape seed oil	52%	52%	52%
	used cooking oil	36%	36%	36%
	palm oil	5%	5%	5%
	soja oil	7%	7%	7%
HVO				
	rape seed oil	52%	52%	52%
	used cooking oil	36%	36%	36%
	palm oil	5%	5%	5%
	soja oil	7%	7%	7%
EtOH				
	wheat&maize	68%	64%	53%
	sugar beet	18%	17%	14%
	sugar cane	10%	9%	8%
	wood	2%	5%	13%
	straw	2%	5%	12%
FT-diesel				
	wood	50%	50%	50%
	straw	50%	50%	50%
CRG				
	from fermentation			
	maize silage & manure	68%	61%	54%
	residues	32%	29%	26%
	from gasification			
	wood	0%	5%	10%
	straw	0%	5%	10%

5.3.4 Strommix

Für die verschiedenen Länder wird der inländische Stromverbrauchsmix auf der Grundlage der IEA-Statistik für das Jahr 2018 (IEA 2019) ermittelt. Die Daten für 2030 und 2050 stammen aus „The EU Reference Scenario 2016: Energy, transport and GHG emissions – Trends to 2050“ (EU-2018).

Der inländische Stromverbrauchsmix besteht aus dem im Inland erzeugten Strom und dem importierten Strom. Für die europäischen Länder wird davon ausgegangen, dass der importierte Strom dem durchschnittlichen zusätzlichen europäischen Strommix aus Öl, Gas, Kohle und Kernenergie entspricht. Für die betrachteten außereuropäischen Länder ist der importierte Strom nicht relevant.

Exportiert ein Land mehr Strom als es importiert, wird nur der im Inland erzeugte Strom berücksichtigt. Bei Ländern, die mehr Strom importieren als exportieren, wird zur Berechnung der Umweltauswirkungen nur der Nettoimport (Differenz aus Import und Export) herangezogen.

Für die gleichzeitig produzierte Wärme aus Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen (KWK) wird eine Energieallokation auf Wärme und Strom angewendet.

Mögliche Unterschiede des methodischen Ansatzes und seiner Anwendung auf die Treibhausgasemissionen im Vergleich zu den in der Vergangenheit von Umweltbehörden und Ministerien in AT, DE und CH veröffentlichten Treibhausgasemissionen sind im Anhang II beschrieben und erläutert. Gründe für die festgestellten Hauptunterschiede:

- Quelle der Stromdaten
- Betrachtetes Jahr
- Generische Daten für die Umweltauswirkungen von Kraftwerken
- Behandlung von Importen und Exporten
- Annahmen für Stromimporte und
- Umgang mit gleichzeitig produzierter Wärme in KWK-Anlagen

Für die Elektrofahrzeuge, die nur fluktuierenden erneuerbaren Strom aus PV und Wind nutzen, ist auch ein Speichersystem integriert, um mögliche Unterschiede hinsichtlich Zeitpunkt der Stromerzeugung und Ladung des Elektrofahrzeugs widerzuspiegeln.

- Anteil am Strommix (Tabelle 15, Tabelle 16 und Tabelle 17)
 - Kohle
 - Öl
 - Gas
 - Kernenergie
 - Biomasse
 - Windkraft
 - Wasserkraft
 - PV
 - Müll
 - Sonstiges
 - Import
 - Export und
 - Nettoimport (Import minus Export)

Der Allokationsfaktor der Treibhausgasemissionen und des Primärenergieaufwands an Strom und Wärme in KWK-Anlagen im Jahr 2019 (Kohle, Öl, Gas und Biomasse) zu Strom beträgt (gemäß IEA-Statistiken und eurostat):

- AT: 57 %
- DE: 82 %
- IT: 77 %
- PT: 80 %
- PL: 75 %
- AU: 95 %

- CA: 95 %

Für alle anderen Länder wird keine Zuordnung vorgenommen. Diese Zuordnungen wurden auch auf 2030 und 2050 angewandt

Tabelle 15: Vordergrunddaten für Strommixe 2019 (IEA 2019)

2019	Europe 28	Austria	Germany	Switzerland	Italy	United Kingdom	Spain	Portugal	Poland	Australia	Canada
	EU	AT	DE	CH	IT	UK	ES	PT	PL	AU	CA
coal	21.0%	5.3%	35.7%	0.0%	11.0%	5.2%	13.9%	19.7%	77.7%	60.3%	8.6%
oil	3.0%	1.0%	0.9%	0.1%	3.7%	0.4%	5.6%	1.9%	0.0%	0.6%	1.2%
natural gas	22.0%	14.8%	12.6%	1.4%	44.1%	39.6%	20.2%	25.1%	7.9%	18.1%	8.8%
nuclear	21.0%	0.0%	11.6%	36.1%	0.0%	18.6%	20.2%	0.0%	0.0%	0.0%	15.0%
biomass	3.0%	7.2%	8.3%	2.4%	6.1%	10.4%	2.6%	5.2%	3.8%	1.5%	2.0%
hydro	10.0%	60.7%	3.6%	55.3%	17.7%	2.4%	13.9%	24.0%	1.5%	7.4%	56.8%
wind	15.0%	8.2%	18.3%	0.2%	6.2%	17.9%	18.8%	21.4%	8.1%	7.1%	6.2%
PV	2.0%	1.8%	7.5%	2.8%	8.2%	4.1%	4.6%	1.9%	0.2%	5.0%	1.3%
waste	3.0%	1.0%	1.1%	1.7%	0.8%	1.4%	0.2%	0.5%	0.8%	0.0%	0.0%
other	0.0%	0.0%	0.3%	0.0%	2.3%	0.0%	0.0%	0.3%	0.0%	0.0%	0.0%
SUM	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
Import	0.0%	38.0%	5.5%	44.9%	14.6%	6.1%	8.8%	10.2%	8.6%	0.0%	2.2%
Export	0.0%	-25.9%	-14.0%	-48.6%	-1.0%	-0.6%	-4.7%	-14.9%	-5.1%	0.0%	-10.2%
Import Netto	0.0%	12.1%	-8.4%	-3.7%	13.6%	5.4%	4.1%	-4.8%	3.6%	0.0%	-8.0%

Tabelle 16: Vordergrunddaten für Strommixe 2030 (EU-2018)

2030	Europe 28	Austria	Germany	Switzerland	Italy	United Kingdom	Spain	Portugal	Poland	Australia	Canada
	EU	AT	DE	CH	IT	UK	ES	PT	PL	AU	CA
coal	16.0%	4.1%	38.0%	0.0%	13.8%	0.9%	5.3%	0.0%	65.0%	45.7%	0.1%
oil	0.6%	0.1%	0.5%	0.1%	2.4%	0.7%	0.6%	2.7%	0.2%	2.4%	0.2%
natural gas	18.6%	18.3%	17.8%	8.5%	37.9%	27.2%	17.4%	10.7%	14.9%	16.8%	11.1%
nuclear	22.1%	0.0%	0.0%	21.1%	0.0%	26.9%	20.0%	0.0%	0.0%	5.0%	11.8%
biomass	8.3%	5.1%	8.9%	1.8%	9.8%	16.6%	3.1%	6.5%	7.8%	4.3%	1.8%
hydro	10.7%	55.7%	3.9%	56.4%	15.4%	1.4%	11.7%	39.1%	1.4%	6.3%	61.5%
wind	17.3%	12.6%	21.0%	1.2%	10.1%	24.0%	25.1%	32.3%	10.7%	14.1%	11.9%
PV	6.6%	4.1%	9.9%	7.7%	10.5%	2.3%	16.9%	8.8%	0.0%	5.5%	1.6%
waste	0.0%	0.0%	0.0%	3.1%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
other	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
SUM	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
Import	0.0%	19.3%	4.0%	50.0%	11.1%	4.1%	4.4%	15.0%	4.2%	0.0%	3.0%
Export	0.0%	-15.0%	-1.4%	-40.0%	-1.3%	-0.8%	-2.7%	-4.3%	-3.5%	0.0%	-0.5%
Import Netto	0.0%	4.3%	2.6%	10.0%	9.8%	3.3%	1.7%	10.7%	0.7%	0.0%	2.5%

Tabelle 17: Vordergrunddaten für Strommixe 2050 (EU-2018)

2050	Europe 28	Austria	Germany	Switzerland	Italy	United Kingdom	Spain	Portugal	Poland	Australia	Canada
	EU	AT	DE	CH	IT	UK	ES	PT	PL	AU	CA
coal	6.2%	0.0%	21.1%	0.0%	0.0%	0.7%	0.2%	0.0%	25.9%	15.0%	0.1%
oil	0.1%	0.0%	0.1%	0.0%	0.2%	0.1%	0.5%	0.9%	0.1%	2.0%	0.2%
natural gas	20.6%	19.3%	19.3%	23.3%	34.4%	29.6%	13.5%	2.7%	17.0%	10.0%	11.1%
nuclear	18.1%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	29.1%	0.0%	0.0%	28.2%	15.0%	11.8%
biomass	10.0%	7.6%	11.7%	3.7%	16.6%	11.2%	3.8%	8.1%	8.5%	10.0%	1.8%
hydro	10.4%	50.5%	4.7%	50.0%	12.9%	1.1%	10.6%	36.7%	1.8%	8.0%	61.5%
wind	24.1%	17.0%	30.2%	3.3%	14.9%	26.2%	38.9%	36.9%	18.3%	30.0%	11.9%
PV	10.6%	5.6%	12.8%	18.3%	21.0%	1.9%	32.6%	14.8%	0.1%	10.0%	1.6%
waste	0.0%	0.0%	0.0%	1.3%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
other	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.1%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
SUM	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
Import	0.0%	13.4%	3.8%	20.0%	6.9%	1.7%	4.0%	11.4%	4.2%	0.0%	1.0%
Export	0.0%	-10.4%	-1.3%	-10.0%	-0.8%	-0.3%	-5.5%	-3.3%	-3.5%	0.0%	0.0%
Import Netto	0.0%	3.0%	2.5%	10.0%	6.0%	1.4%	-1.5%	8.2%	0.7%	0.0%	1.0%

5.3.5 Mögliche zukünftige Entwicklungen

Die Vordergrunddaten zur möglichen zukünftigen Entwicklung sind in Tabelle 18 dargestellt. Sie sind nur für die Anpassung der Hintergrunddaten für 2030 und 2050 relevant, da die anderen Vordergrunddaten bereits für 2030 und 2050 explizit angegeben sind.

- Zukünftige Entwicklungen („Dekarbonisierung“):
 - CO₂-Sequestrierung (CCS)
 - Veränderung der Energieeffizienz
 - Veränderung des Anteils erneuerbarer Energien

Der Anteil der CO₂-Sequestrierung betrifft die fossilen Kraftwerke, in denen das CO₂ gesammelt und unterirdisch gespeichert wird. Dadurch werden einerseits die CO₂-Emissionen aus der Verbrennung reduziert, andererseits wird aber zusätzliche Energie für Trennung, Verdichtung, Transport und Speicherung des CO₂ benötigt, was die Netto-Energieeffizienz verringert.

Die Veränderung der Energieeffizienz beschreibt den Grad der Effizienzsteigerung des gesamten Energiesystems in den Jahren 2030 und 2050 gegenüber 2019. So werden alle Prozesse für die Hintergrunddaten energieeffizienter, was weniger Treibhausgasemissionen und einen geringeren kumulierten Primärenergieaufwand bedeutet.

Die Veränderung des Anteils erneuerbarer Energien bedeutet, dass 2030 und 2050 mehr erneuerbare Energien genutzt werden, so dass der Anteil der kumulierten erneuerbaren Energien zunimmt, da der Anteil der fossilen kumulierten Energien abnimmt.

Aus der Kombination dieser drei Indikatoren werden die Hintergrunddaten für 2030 und 2050 berechnet, die wiederum zur Berechnung der Treibhausgasemissionen und des kumulierten Primärenergieaufwands der zukünftigen Verkehrssysteme in den Jahren 2030 und 2050 verwendet werden.

Mit neuen Technologien – FT-Diesel und CRG aus Vergasung, Wasserstoff und E-Fuels – ist eine zusätzliche Steigerung der Energieeffizienz möglich.

Tabelle 18: Vordergrunddaten für mögliche zukünftige Entwicklungen

	2019	2030	2050
Carbon capture and storage (CCS)	0%	1%	5%
Change in share of renewable energy	0%	20%	30%
Change in energy efficiency	0%	15%	25%
Additional efficiency for emerging technologies*)	0%	12%	8%
*) FT-diesel and CRG from gasification, H2 and E-fuels			

5.4 Hintergrunddaten

Die Hintergrunddaten umfassen alle anderen Daten, die zur Abschätzung der LCA-basierten Treibhausgasemissionen und des kumulierten Primärenergieaufwands der Pkw-basierten Verkehrssysteme erforderlich sind. Diese Daten stammen aus verschiedenen Datenbanken (z. B. GEMIS 2017, ecoinvent 2017) und dem eigenen Datenbestand. Im Folgenden werden die relevantesten Hintergrunddaten dargestellt, die zur Beurteilung und Diskussion der wichtigsten Ergebnisse der LCA erforderlich sind.

Die Hintergrunddaten sind wie folgt gruppiert:

- Fahrzeugproduktion
- Bereitstellung von Energieträgern für das Fahrzeug
- Landnutzungsänderung zum Anbau von Rohstoffen für Biokraftstoffe

5.4.1 Fahrzeugproduktion

Hintergrunddaten zur Fahrzeugproduktion sind:

- Anteil am Materialmix für Fahrzeuge (Tabelle 19) zur Berechnung der Umweltauswirkungen der Fahrzeugproduktion
- Materialien und Energie für die Fahrzeugproduktion (Tabelle 20)

Tabelle 19: Hintergrunddaten für den Materialmix von Fahrzeugen (ohne Batterie, Brennstoffzelle und ICE) (Grundlage: Hausberger et al. 2019 und JOANNEUM RESEARCH 2019)

Propulsion	ICE	ICE	ICE	PHEV	PHEV	PHEV	BEV	HFC
Fuel	petrol & blending, bio-ethanol	diesel & blending, biodiesel	CNG & blending, CRG	petrol & electricity	diesel & electricity	CNG & electricity	electricity	hydrogen (H2)
steel	55.3%	53.9%	57.1%	54.9%	53.6%	56.2%	49.4%	49.2%
cast iron	8.7%	10.3%	8.6%	10.7%	12.0%	10.6%	5.9%	5.9%
aluminium	11.6%	13.0%	11.5%	10.6%	11.9%	10.4%	17.9%	17.8%
glas	2.6%	2.4%	2.6%	2.3%	2.2%	2.3%	2.7%	2.7%
paint	0.4%	0.4%	0.4%	0.4%	0.4%	0.4%	0.4%	0.4%
plastic	13.3%	12.0%	11.8%	12.0%	10.9%	11.0%	12.9%	13.3%
rubber	4.3%	4.0%	4.2%	3.9%	3.6%	3.8%	4.4%	4.4%
oil	0.9%	1.0%	0.9%	0.9%	1.0%	0.9%	0.4%	0.4%
copper	2.5%	2.5%	2.5%	3.2%	3.1%	3.1%	4.1%	4.0%
non ferrous metals	0.3%	0.5%	0.3%	1.2%	1.3%	1.2%	1.8%	1.8%
SUM	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%

Tabelle 20: Hintergrundinformationen zu Materialien und Energie für die Fahrzeugproduktion (JOANNEUM RESEARCH 2019 und GEMIS 2019)

Materials for vehicle production	2019			2030			2050		
	GHG	PED	PED _{loss}	GHG	PED	PED _{loss}	GHG	PED	PED _{loss}
	[gCO ₂ eq/kg]	[kWh/kg]	[kWh/kg]	[gCO ₂ eq/kg]	[kWh/kg]	[kWh/kg]	[gCO ₂ eq/kg]	[kWh/kg]	[kWh/kg]
aluminium	12,100	53	45	9,100	48	42	7,630	45	39
cast iron	905	3.5	3.1	690	3.2	2.8	580	3	2.6
copper	3,610	12	11	2,750	11	9.8	2,320	10	9.2
galvanized steel	2,470	8.9	7.6	1,890	8.1	7	1,600	7.5	6.5
not iron metals	7,670	30	23	5,810	28	22	4,880	26	21
lithium	11,400	195	140	8,520	180	130	7,100	165	120
nickel	2,990	44	26	2,290	40	25	1,940	37	24
platin	27,400	78	76	21,000	71	69	17,800	66	65
propylene	3,610	8.6	7.3	2,710	7.8	6.7	2,260	7.3	6.4
carbon fiber	1,560	20	16	1,210	18	15	1,030	17	14
rubber	3,300	9.9	9.3	2,490	9	8.5	2,080	8.4	8

5.4.2 Bereitstellung von Energieträgern für das Fahrzeug

Die Hintergrunddaten für die Bereitstellung von Energieträgern für das Fahrzeug sind:

- Heizwerte fossiler und biogener Ressourcen (Tabelle 21)
- Heizwerte der Kraftstoffe (Tabelle 22)
- Tankstellenversorgung mit fossilen Kraftstoffen (Tabelle 23)
- Tankstellenversorgung mit Biokraftstoffen (Tabelle 24)
- Stromversorgung von Ladestationen (Tabelle 25)

- Tankstellenversorgung mit Wasserstoff (Tabelle 26)
- Tankstellenversorgung mit E-Fuels (Tabelle 27)

Diese Hintergrunddaten wurden mit den angegebenen Vordergrunddaten mittels LCA berechnet (JOANNEUM RESEARCH 2019). Weitere Details zu den Hintergrunddaten finden Sie in den Kapiteln 10.2 bis 10.4.

Tabelle 21: Hintergrunddaten für Heizwerte fossiler und biogener Ressourcen (JOANNEUM RESEARCH 2019)

Fossil resources	[kWh/kg]	[kWh/Nm³]
hard coal	7.6	
lignite	2.8	
raw oil	11.1	
natural gas		10.0
Biomass resources	[kWh/kg]	
wood	3.7	
maize	2.8	
wheat	3.9	
sugar beet	0.8	
rape seeds	6.8	
soy beans	4.7	
palm oil fruits	6.2	
sugar cane	2.5	
maize silage	1.5	
straw	3.9	
used cooking oil	10.3	
bio-waste (DM)	2.2	
manure (DM)	3.0	

Tabelle 22: Hintergrunddaten für Heizwerte von Kraftstoffen (JOANNEUM RESEARCH 2019, vergleichbar mit EU 2018a)

	[kWh/kg]	[kWh/l]	[kWh/Nm ³]
diesel	11.8	9.8	
petrol	11.9	8.8	
CNG	15.4		10.0
diesel B7		9.7	
petrol E5		8.7	
petrol E10		8.5	
FAME	10.3	9.1	
HVO	12.2	9.5	
FT-diesel	12.2	10.2	
EtOH	7.4	5.8	
CRG	15.4		10.0
H2	33.3		
E-fuel FT-diesel	12.2	10.2	
E-fuel CRG	15.4		10.0

Tabelle 23: Hintergrunddaten zur Tankstellenversorgung mit fossilen Kraftstoffen (JOANNEUM RESEARCH 2019)

Fuel supply	2019			2030			2050		
	GHG	PED	PED _{foss}	GHG	PED	PED _{foss}	GHG	PED	PED _{foss}
	[gCO ₂ eq/kWh]	[kWh/kWh]	[kWh/kWh]	[gCO ₂ eq/kWh]	[kWh/kWh]	[kWh/kWh]	[gCO ₂ eq/kWh]	[kWh/kWh]	[kWh/kWh]
diesel / raw oil	45	1.2	1.2	37	1.2	1.2	34	1.2	1.2
diesel / raw oil - oil sands	175	1.6	1.6	145	1.6	1.6	130	1.6	1.6
petrol / raw oil	69	1.3	1.3	58	1.3	1.3	52	1.3	1.3
petrol / raw oil - oil sands	200	1.7	1.7	165	1.7	1.7	150	1.7	1.7
CNG / natural gas	38	1.1	1.1	33	1.1	1.1	31	1.1	1.1
CNG / natural gas - fracking	130	1.4	1.4	115	1.3	1.3	105	1.3	1.3

Tabelle 24: Hintergrunddaten zur Tankstellenversorgung mit Biokraftstoffen (JOANNEUM RESEARCH 2019)

Supply of biofuels	2019			2030			2050		
	GHG	PED	PED _{foss}	GHG	PED	PED _{foss}	GHG	PED	PED _{foss}
	[gCO ₂ eq/kWh]	[kWh/kWh]	[kWh/kWh]	[gCO ₂ eq/kWh]	[kWh/kWh]	[kWh/kWh]	[gCO ₂ eq/kWh]	[kWh/kWh]	[kWh/kWh]
EtOH / wheat&maize	255	2.5	0.91	220	2.5	0.88	200	2.5	0.87
EtOH / sugar beet	265	2.3	1.00	225	2.3	1.00	205	2.3	1.00
EtOH / sugar cane	99	5.1	0.25	78	4.5	0.23	66	4.1	0.21
EtOH / wood	41	2.1	0.12	34	2.1	0.10	31	2.2	0.09
EtOH / straw	77	2.0	0.17	70	2.1	0.15	66	2.1	0.15
FAME / rape seed oil	205	2.2	0.46	190	2.2	0.46	185	2.2	0.45
FAME / waste cooking oil	16	1.1	0.13	14	1.1	0.12	12	1.1	0.12
FAME / palm oil	220	4.7	0.56	185	4.2	0.51	160	3.8	0.48
FAME / soja oil	52	1.9	0.36	38	1.8	0.34	31	1.8	0.33
HVO / rape seed oil	240	2.4	0.57	210	2.4	0.54	200	2.4	0.53
HVO / waste cooking oil	49	1.3	0.23	33	1.2	0.21	26	1.2	0.20
HVO / palm oil	255	4.9	0.66	200	4.3	0.60	175	4.0	0.56
HVO / soja oil	85	2.1	0.46	58	2.0	0.43	45	1.9	0.41
CRG / maize silage & manure	67	2.0	0.62	43	1.9	0.61	30	1.9	0.59
CRG / residues	54	1.7	0.24	44	1.7	0.23	39	1.7	0.22
CRG / wood	5	1.5	0.01	3.7	1.3	0.06	3.1	1.3	0.08
CRG / straw	34	1.5	0.06	30	1.4	0.10	27	1.3	0.12
FT-diesel / straw	69	1.9	0.17	59	1.8	0.21	54	1.7	0.23
FT-diesel / wood	34	1.9	0.11	29	1.7	0.16	26	1.6	0.18

Tabelle 25: Hintergrunddaten zur Stromversorgung von Ladestationen (JOANNEUM RESEARCH 2019, Grundlage: Strommix wie in den Vordergrunddaten definiert)⁵

Supply of electricity to the charging station	2019			2030			2050		
	GHG	PED	PED _{foss}	GHG	PED	PED _{foss}	GHG	PED	PED _{foss}
	[gCO ₂ eq/kWh]	[kWh/kWh]	[kWh/kWh]	[gCO ₂ eq/kWh]	[kWh/kWh]	[kWh/kWh]	[gCO ₂ eq/kWh]	[kWh/kWh]	[kWh/kWh]
electr. / hydro	7	1.1	0.02	6.7	1.1	0.02	6.7	1.1	0.02
electr. / wind	11	1.1	0.03	11	1.1	0.03	11	1.1	0.03
electr. / PV	60	1.3	0.21	59	1.3	0.21	59	1.3	0.20
electr. / EU28	425	2.6	2.20	305	2.3	1.70	200	2.1	1.30
electr. / AT	160	1.5	0.70	110	1.3	0.44	80	1.2	0.35
electr. / DE	415	2.2	1.70	435	1.9	1.30	285	1.7	0.89
electr. / CH	55	2.2	1.40	140	2.0	1.30	175	1.6	0.82
electr. / IT	370	2.0	1.50	325	1.8	1.20	180	1.6	0.78
electr. / UK	335	2.6	2.00	210	2.5	1.70	200	2.4	1.80
electr. / ES	350	2.4	1.90	190	2.0	1.40	105	1.4	0.40
electr. / PT	315	1.7	1.10	125	1.5	0.58	67	1.4	0.34
electr. / PL	680	2.2	2.00	590	1.9	1.60	295	2.2	1.80
electr. / AU	735	2.5	2.20	585	2.2	1.80	240	2.0	1.20
electr. / CA	165	1.8	1.10	87	1.6	0.74	74	1.5	0.68

⁵Für den Strommix sind mögliche Unterschiede des methodischen Ansatzes und seiner Anwendung auf die Treibhausgasemissionen im Vergleich zu den in der Vergangenheit von Umweltbehörden und Ministerien in AT, DE und CH veröffentlichten Treibhausgasemissionen im Anhang II beschrieben und erläutert.

Tabelle 26: Hintergrunddaten zur Tankstellenversorgung mit Wasserstoff (JOANNEUM RESEARCH 2019)

Supply of hydrogen	2019			2030			2050		
	GHG	PED	PED _{foss}	GHG	PED	PED _{foss}	GHG	PED	PED _{foss}
	[gCO ₂ eq/kWh]	[kWh/kWh]	[kWh/kWh]	[gCO ₂ eq/kWh]	[kWh/kWh]	[kWh/kWh]	[gCO ₂ eq/kWh]	[kWh/kWh]	[kWh/kWh]
H2 / natural gas	385	1.9	1.90	305	1.8	1.70	265	1.7	1.60
H2 / natural gas - fracking	500	2.2	2.10	400	2.0	1.90	350	1.8	1.80
H2 / hydro	13	2.0	0.03	10	1.8	0.00	8.8	1.7	0.00
H2 / wind	22	2.0	0.06	17	1.9	0.03	15	1.8	0.02
H2 / PV	110	2.4	0.39	85	2.2	0.33	72	2.1	0.30

Tabelle 27: Hintergrunddaten zur Tankstellenversorgung mit E-Fuels (JOANNEUM RESEARCH 2019)

Supply of E-fuels	2019			2030			2050		
	GHG	PED	PED _{foss}	GHG	PED	PED _{foss}	GHG	PED	PED _{foss}
	[gCO ₂ eq/kWh]	[kWh/kWh]	[kWh/kWh]	[gCO ₂ eq/kWh]	[kWh/kWh]	[kWh/kWh]	[gCO ₂ eq/kWh]	[kWh/kWh]	[kWh/kWh]
E-fuel FT-diesel / wind & CO2 ind.	39	2.5	0.1	30	2.3	0.1	25	2.3	0.081
E-fuel FT-diesel / wind & CO2 air	300	3.8	1.4	180	3.2	0.93	125	2.9	0.7
E-fuel FT-diesel / wind & biomass	25	2.1	0.1	20	1.8	0.033	17	1.7	0.016
E-fuel CRG / wind & CO2 ind.	33	2.2	0.1	26	2.1	0.082	22	2.1	0.066
E-fuel CRG / wind & CO2 air	205	3.1	0.9	125	2.7	0.63	88	2.5	0.47
E-fuel CRG / wind & biomass	22	1.9	0.1	21	2	0.038	20	2.1	0.029
E-fuel FT-diesel / eu_mix & CO2 ind.	990	5.9	5.0	770	5.4	4.5	645	5	4.1
E-fuel FT-diesel / eu_mix & CO2 air	1.250	7.3	6.2	915	6.3	5.3	740	5.7	4.8
E-fuel FT-diesel / eu_mix & biomass	425	3.6	2.1	395	3.7	2.2	360	3.8	2.3
E-fuel CRG / eu_mix & CO2 ind.	895	5.4	4.5	705	4.9	4.1	595	4.6	3.8
E-fuel CRG / eu_mix & CO2 air	1.070	6.3	5.3	800	5.5	4.6	660	5.1	4.2
E-fuel CRG / eu_mix & biomass	390	3.2	1.9	365	3.5	2.1	345	3.6	2.2

5.4.3 Landnutzungsänderung zum Anbau von Rohstoffen für Biokraftstoffe

Die Hintergrunddaten zur Landnutzungsänderung für Biomasse-Ressourcen sind in Tabelle 28 angegeben. Die iLUC-Daten dienen nur zur Veranschaulichung und werden nicht in die Analyse einbezogen (siehe auch Kapitel 3.4.2).

Tabelle 28: Hintergrunddaten zur direkten und indirekten Landnutzungsänderung (LUC) für Biomasse-Ressourcen (Grundlage: EU 2009, EU 2015)

iLUC*)	[gCO ₂ /MJ]	[gCO ₂ /kWh]
bioethanol (wheat, maize)	12	43
bioethanol (sugar beet)	13	47
bioethanol (sugar cane)	17	61
FAME/HVO (rape seeds)	33	119
FAME/HVO (soja beans)	55	198
FAME/HVO (palm oil)	66	238
dLUC*)	[kgCO ₂ /ha]	
sugar cane (greenland)	2.576	
soja beans (greenland)	2.825	
palm oil (trop. forest)	28.441	
	[gCO ₂ /kWh]	
EtOH / sugar cane	68	
FAME / palm oil	804	
FAME / soja oil	330	
HVO / palm oil	805	
HVO / soja oil	331	
*) in brackets is the previous use of the land		

6. Ergebnisse

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse der LCA-basierten Schätzung der Treibhausgasemissionen und des kumulierten Primärenergieaufwands dargestellt.

6.1 Einleitung

Die detaillierten Ergebnisse der einzelnen Verkehrssysteme sind in Datenblättern (Konzept siehe Abbildung 9) dargestellt. Der Schwerpunkt dieses Berichts liegt auf dem Vergleich der verschiedenen Verkehrssysteme hinsichtlich Treibhausgasemissionen und gesamtem Primärenergieaufwand, sofern dies von besonderem Interesse ist, z. B. bei E-Fuels und Wasserstoff. Die Diskussion der Ergebnisse erfolgt anhand von drei Gruppen möglicher Treibhausgasemissionen:

1. Hohe Treibhausgasemissionen: über 150 g CO₂-Äq./km
2. Durchschnittliche Treibhausgasemissionen: zwischen 70 und 150 g CO₂-Äq./km
3. Niedrige Treibhausgasemissionen: unter 70 g CO₂-Äq./km

In einem ersten Schritt werden die möglichen Bereiche der Treibhausgasemissionen pro Kilometer der folgenden sechs Gruppen vorgestellt und diskutiert:

1. Verbrennerfahrzeug (ICEV) mit fossilem Kraftstoff (einschl. Beimischung von Biokraftstoffen):
2. Plug-in-Hybrid (PHEV)
3. Batterie-Elektrofahrzeug (BEV)
4. Wasserstoffbrennstoffzellen-Fahrzeug (HFCV)
5. Biokraftstoff-Verbrennerfahrzeug (ICEV)
6. E-Fuel-Verbrennerfahrzeug (ICEV)

In einem zweiten Schritt wird ein Vergleich des ausgewählten Systems für die EU-28 aus diesen sechs Gruppen auf der Grundlage der kumulierten Treibhausgasemissionen über die gesamte Lebensdauer durchgeführt.

Der Vergleich erfolgt anhand der „geschätzten Bereiche“ von Treibhausgasemissionen und kumuliertem Primärenergieaufwand für jeden Stand der Technik (2019, 2030 und 2050). Die mögliche Entwicklung durch den Vergleich der verschiedenen Zustände der Technologien ist auf Basis der „geschätzten durchschnittlichen“ Treibhausgasemissionen und des kumulierten Primärenergieaufwands über die Jahre 2019, 2030 und 2050 grafisch dargestellt.

6.2 Verbrennerfahrzeug (ICEV) mit fossilem Kraftstoff (einschl. Beimischung von Biokraftstoffen)

In Tabelle 29 sind die geschätzten Bereiche der Treibhausgasemissionen und des Primärenergieaufwands für ICEV mit fossilem Kraftstoff (inkl. Biokraftstoffbeimischung) dargestellt. Alle genannten Systeme, die fossile Energie nutzen, weisen mit der aktuellen Technologie Treibhausgasemissionen von über 150 g CO₂-Äq./km auf. Künftig werden Diesel und CNG Treibhausgasemissionen von weniger als 150 g CO₂-Äq./km aufweisen. Der fossile und insgesamt kumulierte Primärenergieaufwand ist etwa gleich hoch, da hauptsächlich fossile Energie verwendet wird. Benzin hat den höchsten Primärenergieaufwand, Erdgas künftig den niedrigsten.

In Abbildung 24 sind die geschätzten durchschnittlichen Treibhausgasemissionen für ICEV mit fossilem Kraftstoff bei aktueller Technologie dargestellt. Abbildung 25 zeigt die mögliche Entwicklung der geschätzten durchschnittlichen Treibhausgasemissionen von ICEV mit fossilem Kraftstoff für Zukunftstechnologien, wobei eine Verbesserung aufgrund des erwarteten geringeren Kraftstoffverbrauchs der Fahrzeuge ersichtlich ist.

Tabelle 29: Geschätzte Bereiche der Treibhausgasemissionen und des Primärenergieaufwands von Verbrennerfahrzeugen (ICEV) mit fossilem Kraftstoff (einschl. Beimischung von Biokraftstoffen)

COMPARISON		GHG [gCO ₂ eq/km]	PED [kWh/km]	PED _{foss} [kWh/km]
ICE_petrol,raw oil,EU28	2019	230 to 240	0.84 to 0.94	0.82 to 0.92
	2030	200 to 210	0.77 to 0.87	0.75 to 0.85
	2050	165 to 175	0.66 to 0.76	0.64 to 0.74
ICE_petrol E5,raw oil,EU28	2019	225 to 235	0.87 to 0.97	0.81 to 0.91
	2030	195 to 205	0.80 to 0.90	0.74 to 0.84
	2050	160 to 170	0.67 to 0.77	0.63 to 0.73
ICE_petrol E10,raw oil,EU28	2019	225 to 235	0.90 to 1	0.81 to 0.91
	2030	195 to 205	0.82 to 0.92	0.73 to 0.83
	2050	160 to 170	0.69 to 0.79	0.62 to 0.72
ICE_diesel,raw oil,EU28	2019	185 to 195	0.67 to 0.77	0.65 to 0.75
	2030	165 to 175	0.62 to 0.72	0.60 to 0.70
	2050	135 to 145	0.52 to 0.62	0.51 to 0.61
ICE_diesel B7,raw oil,EU28	2019	180 to 190	0.69 to 0.79	0.63 to 0.73
	2030	160 to 170	0.64 to 0.74	0.58 to 0.68
	2050	130 to 140	0.54 to 0.64	0.49 to 0.59
ICE_CNG,natural gas,EU28	2019	175 to 185	0.78 to 0.88	0.77 to 0.87
	2030	155 to 165	0.70 to 0.80	0.68 to 0.78
	2050	125 to 135	0.46 to 0.56	0.45 to 0.55
ICE_CNG CRG5,natural gas,EU28	2019	165 to 175	0.80 to 0.90	0.75 to 0.85
	2030	145 to 155	0.72 to 0.82	0.66 to 0.76
	2050	120 to 130	0.48 to 0.58	0.44 to 0.54

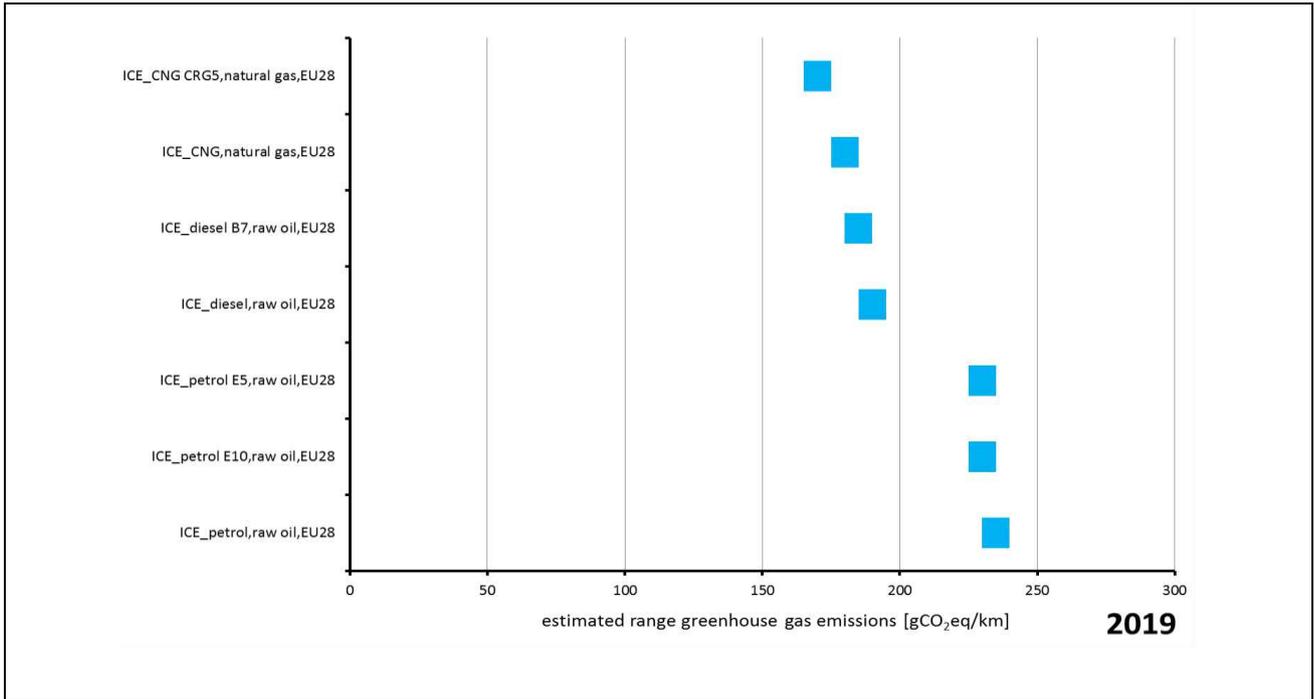


Abbildung 24: Geschätzte Bereiche der Treibhausgasemissionen von Verbrennerfahrzeugen (ICEV) mit fossilem Kraftstoff (einschl. Beimischung von Biokraftstoffen) für 2019

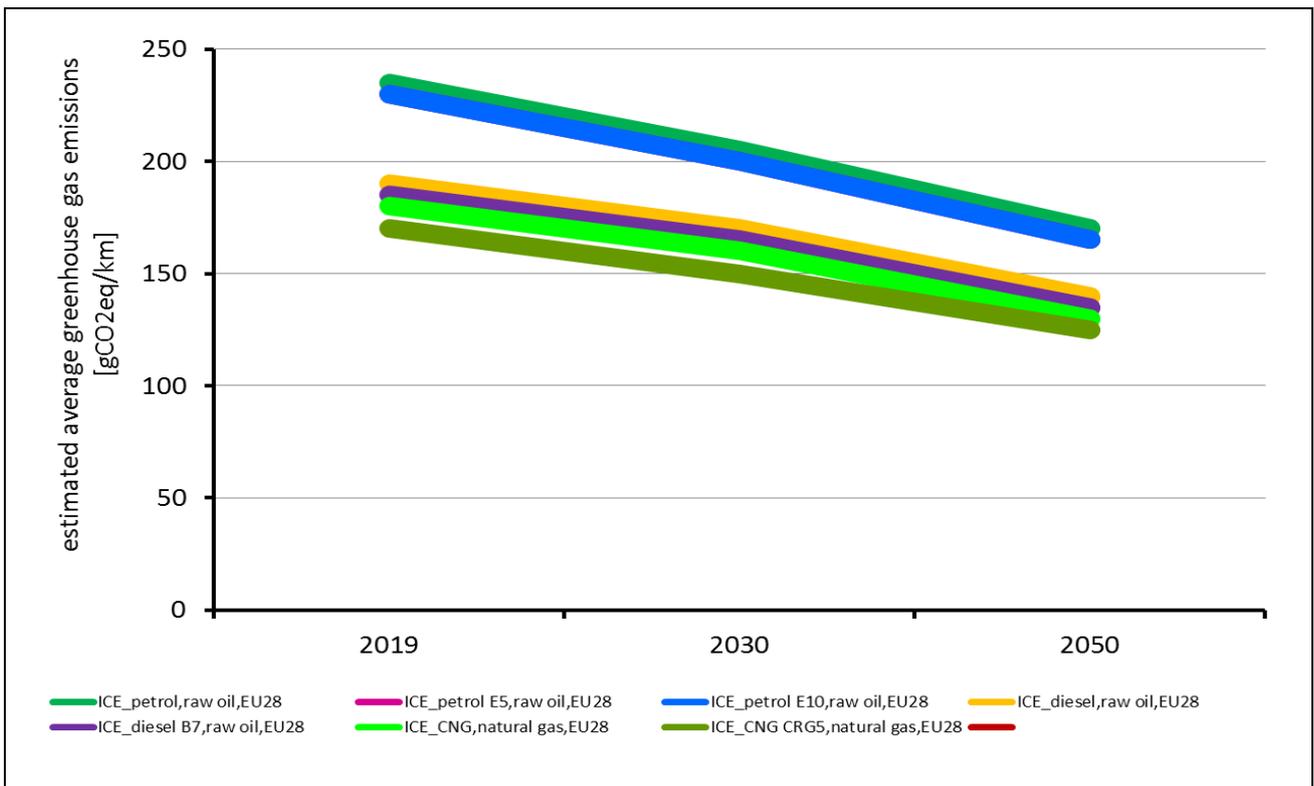


Abbildung 25: Mögliche Entwicklung der geschätzten durchschnittlichen Treibhausgasemissionen von Verbrennerfahrzeugen (ICEV) mit fossilem Kraftstoff (einschl. Beimischung von Biokraftstoffen)

6.3 Plug-in-Hybrid (PHEV)

In [Tabelle 30](#) sind die geschätzten Bereiche der Treibhausgasemissionen und der Primärenergie für Benzin-PHEV und in [Tabelle 31](#) für Diesel-PHEV mit dem Strommix für die betrachteten Länder dargestellt.

Mit der derzeitigen Technologie liegen die Treibhausgasemissionen von Benzin-PHEV über 150 g CO₂-Äq./km. Die Ausnahme bilden Länder, die bereits einen hohen Anteil an erneuerbarem Strom haben, wie AT, CH und CA. In Zukunft werden alle Systeme aufgrund der zu erwartenden höheren Kraftstoffeffizienz und eines höheren Anteils an erneuerbarem Strom Treibhausgasemissionen von weniger als 150 g CO₂-Äq./km aufweisen, außer in Ländern, deren Strommix 2030 noch einen hohen Anteil an fossiler Energie aufweist. Jedoch wird kein PHEV Treibhausgasemissionen von weniger als 70 g CO₂-Äq./km erreichen.

Mit der derzeitigen Technologie liegen die Treibhausgasemissionen von Diesel-PHEV über 150 g CO₂-Äq./km. Die Ausnahme bilden Länder, die bereits einen hohen Anteil an erneuerbarem Strom haben, wie AT, CH und CA. In Zukunft werden alle Systeme aufgrund der zunehmenden Kraftstoffeffizienz und eines höheren Anteils an erneuerbarem Strom Treibhausgasemissionen von weniger als 150 g CO₂-Äq./km aufweisen, außer in Ländern, deren Strommix 2030 noch einen hohen Anteil an fossiler Energie aufweist. Bei keinem werden jedoch die Treibhausgasemissionen unter 70 g CO₂-Äq./km liegen.

In [Abbildung 26](#) sind die geschätzten durchschnittlichen Treibhausgasemissionen für Benzin- und in [Abbildung 27](#) für Diesel-PHEV mit dem Strommix für die betrachteten Länder dargestellt.

[Abbildung 28](#) und [Abbildung 29](#) zeigen die mögliche Entwicklung der geschätzten durchschnittlichen Treibhausgasemissionen von Benzin- bzw. Diesel-PHEV mit dem Strommix für die betrachteten Länder.

Tabelle 30: Geschätzte Bereiche der Treibhausgasemissionen und des Primärenergieaufwands von mit Benzin und Strom betriebenen Plug-in-Hybriden (PHEV)

COMPARISON		GHG [gCO ₂ eq/km]	PED [kWh/km]	PED _{foss} [kWh/km]
PHEV_petrol&el,raw oil&el,EU28	2019	175 to 185	0.76 to 0.86	0.68 to 0.78
	2030	135 to 145	0.65 to 0.75	0.56 to 0.66
	2050	100 to 110	0.5 to 0.60	0.42 to 0.52
PHEV_petrol&el,raw oil&el,AT	2019	145 to 155	0.62 to 0.72	0.5 to 0.60
	2030	115 to 125	0.53 to 0.63	0.42 to 0.52
	2050	88 to 98	0.42 to 0.52	0.33 to 0.43
PHEV_petrol&el,raw oil&el,DE	2019	175 to 185	0.71 to 0.81	0.62 to 0.72
	2030	150 to 160	0.59 to 0.69	0.51 to 0.61
	2050	105 to 115	0.46 to 0.56	0.38 to 0.48
PHEV_petrol&el,raw oil&el,CH	2019	130 to 140	0.70 to 0.80	0.59 to 0.69
	2030	120 to 130	0.61 to 0.71	0.51 to 0.61
	2050	95 to 105	0.46 to 0.56	0.37 to 0.47
PHEV_petrol&el,raw oil&el,IT	2019	170 to 180	0.68 to 0.78	0.61 to 0.71
	2030	140 to 150	0.59 to 0.69	0.5 to 0.60
	2050	95 to 105	0.46 to 0.56	0.37 to 0.47
PHEV_petrol&el,raw oil&el,UK	2019	165 to 175	0.75 to 0.85	0.66 to 0.76
	2030	125 to 135	0.66 to 0.76	0.56 to 0.66
	2050	100 to 110	0.53 to 0.63	0.46 to 0.56
PHEV_petrol&el,raw oil&el,ES	2019	165 to 175	0.73 to 0.83	0.65 to 0.75
	2030	125 to 135	0.61 to 0.71	0.52 to 0.62
	2050	90 to 100	0.44 to 0.54	0.33 to 0.43
PHEV_petrol&el,raw oil&el,PT	2019	160 to 170	0.65 to 0.75	0.55 to 0.65
	2030	115 to 125	0.55 to 0.65	0.43 to 0.53
	2050	87 to 97	0.44 to 0.54	0.33 to 0.43
PHEV_petrol&el,raw oil&el,PL	2019	205 to 215	0.71 to 0.81	0.66 to 0.76
	2030	170 to 180	0.60 to 0.70	0.55 to 0.65
	2050	105 to 115	0.52 to 0.62	0.46 to 0.56
PHEV_petrol&el,raw oil&el,AU	2019	215 to 225	0.74 to 0.84	0.69 to 0.79
	2030	170 to 180	0.63 to 0.73	0.57 to 0.67
	2050	100 to 110	0.49 to 0.59	0.41 to 0.51
PHEV_petrol&el,raw oil&el,CA	2019	145 to 155	0.66 to 0.76	0.55 to 0.65
	2030	110 to 120	0.56 to 0.66	0.45 to 0.55
	2050	87 to 97	0.45 to 0.55	0.36 to 0.46

Tabelle 31: Geschätzte Bereiche der Treibhausgasemissionen und des Primärenergieaufwands von mit Diesel und Strom betriebenen Plug-in-Hybriden (PHEV)

COMPARISON		GHG [gCO ₂ eq/km]	PED [kWh/km]	PED _{foss} [kWh/km]
PHEV_diesel&el,raw oil&el,EU28	2019	160 to 170	0.71 to 0.81	0.63 to 0.73
	2030	125 to 135	0.60 to 0.70	0.51 to 0.61
	2050	89 to 99	0.46 to 0.56	0.37 to 0.47
PHEV_diesel&el,raw oil&el,AT	2019	130 to 140	0.57 to 0.67	0.45 to 0.55
	2030	105 to 115	0.48 to 0.58	0.37 to 0.47
	2050	78 to 88	0.38 to 0.48	0.29 to 0.39
PHEV_diesel&el,raw oil&el,DE	2019	160 to 170	0.66 to 0.76	0.57 to 0.67
	2030	140 to 150	0.55 to 0.65	0.46 to 0.56
	2050	95 to 105	0.42 to 0.52	0.34 to 0.44
PHEV_diesel&el,raw oil&el,CH	2019	115 to 125	0.65 to 0.75	0.54 to 0.64
	2030	105 to 115	0.56 to 0.66	0.46 to 0.56
	2050	87 to 97	0.42 to 0.52	0.33 to 0.43
PHEV_diesel&el,raw oil&el,IT	2019	155 to 165	0.63 to 0.73	0.55 to 0.65
	2030	125 to 135	0.54 to 0.64	0.46 to 0.56
	2050	87 to 97	0.42 to 0.52	0.33 to 0.43
PHEV_diesel&el,raw oil&el,UK	2019	150 to 160	0.70 to 0.80	0.61 to 0.71
	2030	115 to 125	0.62 to 0.72	0.51 to 0.61
	2050	89 to 99	0.49 to 0.59	0.41 to 0.51
PHEV_diesel&el,raw oil&el,ES	2019	155 to 165	0.68 to 0.78	0.60 to 0.70
	2030	115 to 125	0.57 to 0.67	0.47 to 0.57
	2050	80 to 90	0.40 to 0.5	0.29 to 0.39
PHEV_diesel&el,raw oil&el,PT	2019	150 to 160	0.60 to 0.70	0.5 to 0.60
	2030	105 to 115	0.5 to 0.60	0.38 to 0.48
	2050	77 to 87	0.40 to 0.5	0.29 to 0.39
PHEV_diesel&el,raw oil&el,PL	2019	195 to 205	0.66 to 0.76	0.61 to 0.71
	2030	155 to 165	0.55 to 0.65	0.5 to 0.60
	2050	100 to 110	0.47 to 0.57	0.42 to 0.52
PHEV_diesel&el,raw oil&el,AU	2019	200 to 210	0.69 to 0.79	0.64 to 0.74
	2030	155 to 165	0.59 to 0.69	0.52 to 0.62
	2050	93 to 105	0.45 to 0.55	0.36 to 0.46
PHEV_diesel&el,raw oil&el,CA	2019	130 to 140	0.61 to 0.71	0.5 to 0.60
	2030	100 to 110	0.51 to 0.61	0.40 to 0.5
	2050	78 to 88	0.41 to 0.51	0.32 to 0.42

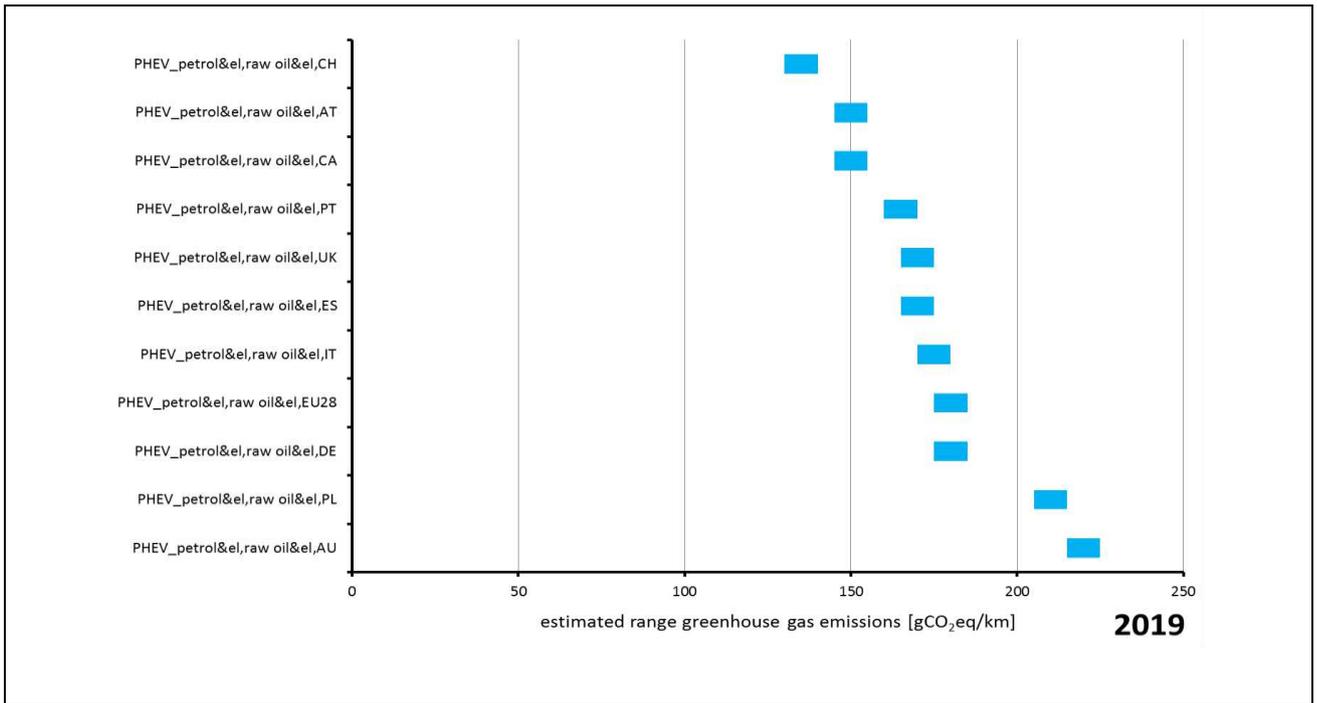


Abbildung 26: Geschätzte Bereiche der Treibhausgasemissionen von mit Benzin und Strom betriebenen Plug-in-Hybriden (PHEV)

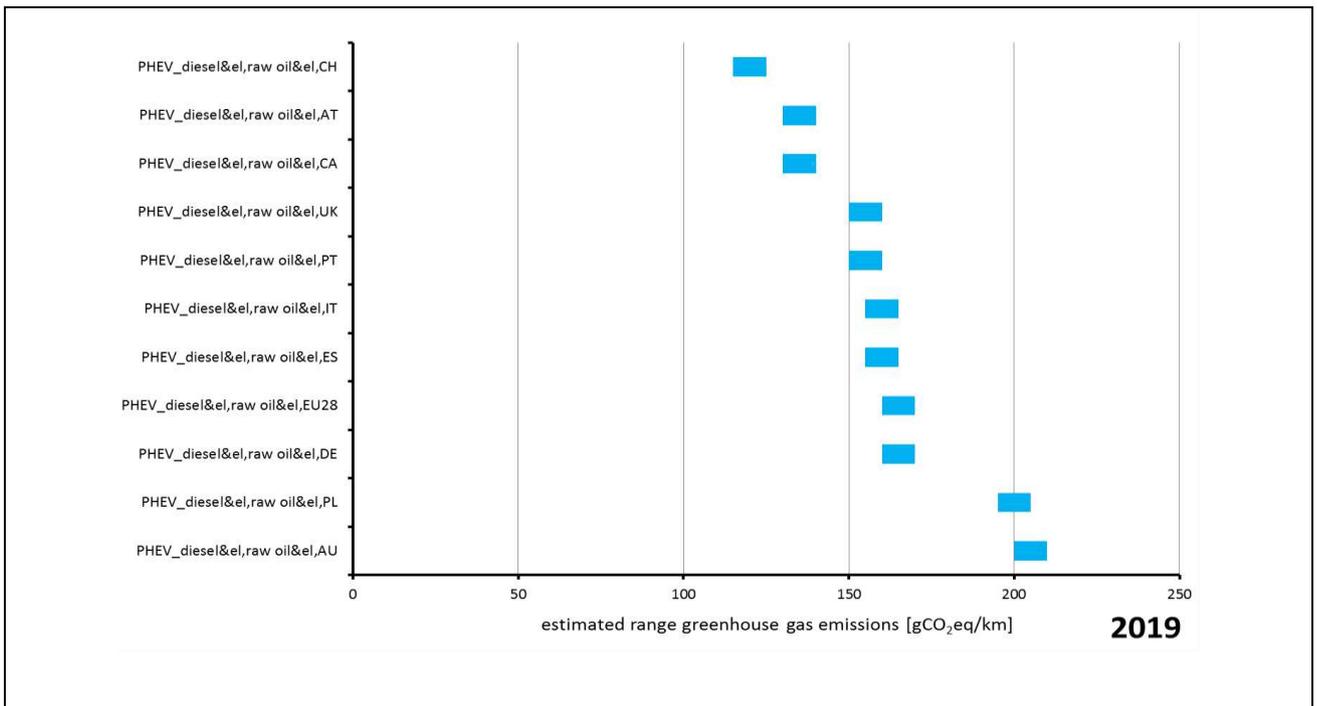


Abbildung 27: Geschätzte Bereiche der Treibhausgasemissionen von mit Diesel und Strom betriebenen Plug-in-Hybriden (PHEV)

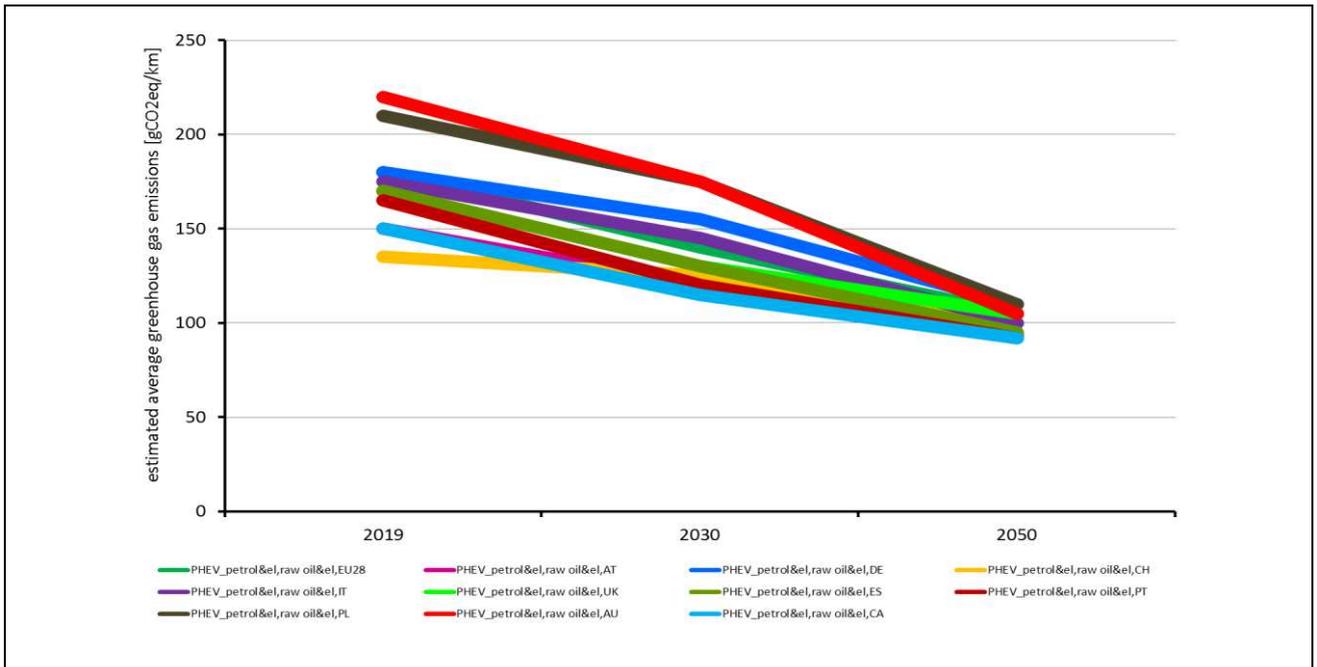


Abbildung 28: Mögliche Entwicklung der geschätzten durchschnittlichen Treibhausgasemissionen von mit Benzin und Strom betriebenen Plug-in-Hybriden (PHEV)

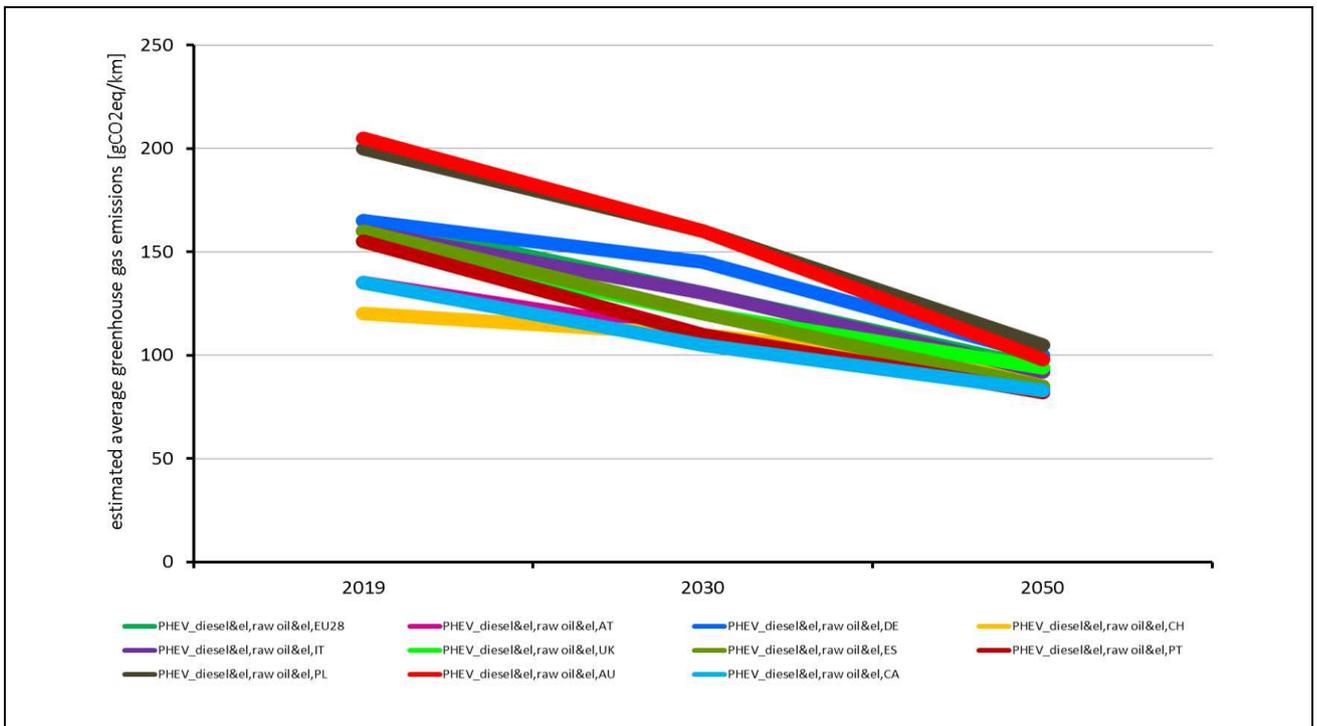


Abbildung 29: Mögliche Entwicklung der geschätzten durchschnittlichen Treibhausgasemissionen von mit Diesel und Strom betriebenen Plug-in-Hybriden (PHEV)

6.4 Batterie-Elektrofahrzeug (BEV)

In Tabelle 32 sind für die betrachteten Länder die geschätzten Bereiche der Treibhausgasemissionen und der Primärenergie für Batterie-Elektrofahrzeuge (BEV) und in Tabelle 33 für erneuerbaren Strom dargestellt.

Mit der derzeitigen Technologie sind die Treibhausgasemissionen des BEV durchweg niedriger als 150 g CO₂-Äq./km, außer in Ländern, die noch immer einen hohen Anteil an Strom aus fossilen Energieträgern haben, wie PL und AU. In Zukunft werden alle Systeme aufgrund der zunehmenden Energieeffizienz der Fahrzeuge und eines höheren Anteils an erneuerbarem Strom Treibhausgasemissionen von weniger als 150 g CO₂-Äq./km aufweisen. In Ländern mit einem sehr hohen Anteil an erneuerbarem Strom, wie AT, CH, CA, liegen die Treibhausgasemissionen noch unter 100 g CO₂-Äq./km. Bei erneuerbarem Strom sind die Treibhausgasemissionen bei den aktuellen Technologien bereits sehr gering (unter 70 g CO₂-Äq./km).

In Abbildung 30 sind die geschätzten durchschnittlichen Treibhausgasemissionen von BEV für die betrachteten Länder und in Abbildung 31 bei erneuerbarem Strom in den EU-28 dargestellt. Abbildung 32 und Abbildung 33 zeigen die mögliche Entwicklung der geschätzten durchschnittlichen Treibhausgasemissionen von BEV für die betrachteten Länder bzw. für erneuerbaren Strom in den EU-28. Künftig werden die Treibhausgasemissionen von BEV, die erneuerbaren Strom nutzen, bei unter 30 g CO₂-Äq./km liegen.

Tabelle 32: Geschätzte Bereiche der Treibhausgasemissionen und des Primärenergieaufwands von Batterie-Elektrofahrzeugen (BEV) für die betrachteten Länder

COMPARISON		GHG [gCO ₂ eq/km]	PED [kWh/km]	PED _{foss} [kWh/km]
BEV_electr.,mix,EU28	2019	140 to 150	0.75 to 0.85	0.62 to 0.72
	2030	91 to 100	0.60 to 0.70	0.45 to 0.55
	2050	49 to 59	0.44 to 0.54	0.28 to 0.38
BEV_electr.,mix,AT	2019	83 to 93	0.51 to 0.61	0.31 to 0.41
	2030	53 to 63	0.39 to 0.49	0.20 to 0.30
	2050	28 to 38	0.29 to 0.39	0.12 to 0.22
BEV_electr.,mix,DE	2019	135 to 145	0.67 to 0.77	0.52 to 0.62
	2030	115 to 125	0.51 to 0.61	0.37 to 0.47
	2050	63 to 73	0.37 to 0.47	0.21 to 0.31
BEV_electr.,mix,CH	2019	60 to 70	0.66 to 0.76	0.46 to 0.56
	2030	58 to 68	0.54 to 0.64	0.36 to 0.46
	2050	44 to 54	0.36 to 0.46	0.20 to 0.30
BEV_electr.,mix,IT	2019	125 to 135	0.62 to 0.72	0.49 to 0.59
	2030	95 to 105	0.5 to 0.60	0.36 to 0.46
	2050	45 to 55	0.36 to 0.46	0.19 to 0.29
BEV_electr.,mix,UK	2019	120 to 130	0.74 to 0.84	0.58 to 0.68
	2030	72 to 82	0.63 to 0.73	0.45 to 0.55
	2050	48 to 58	0.5 to 0.60	0.36 to 0.46
BEV_electr.,mix,ES	2019	125 to 135	0.70 to 0.80	0.57 to 0.67
	2030	69 to 79	0.54 to 0.64	0.38 to 0.48
	2050	32 to 42	0.32 to 0.42	0.13 to 0.23
BEV_electr.,mix,PT	2019	115 to 125	0.56 to 0.66	0.39 to 0.49
	2030	56 to 66	0.43 to 0.53	0.23 to 0.33
	2050	26 to 36	0.32 to 0.42	0.12 to 0.22
BEV_electr.,mix,PL	2019	195 to 205	0.66 to 0.76	0.59 to 0.69
	2030	150 to 160	0.52 to 0.62	0.43 to 0.53
	2050	65 to 75	0.47 to 0.57	0.37 to 0.47
BEV_electr.,mix,AU	2019	205 to 215	0.72 to 0.82	0.63 to 0.73
	2030	145 to 155	0.58 to 0.68	0.47 to 0.57
	2050	55 to 65	0.43 to 0.53	0.27 to 0.37
BEV_electr.,mix,CA	2019	83 to 93	0.58 to 0.68	0.39 to 0.49
	2030	48 to 58	0.45 to 0.55	0.26 to 0.36
	2050	27 to 37	0.35 to 0.45	0.18 to 0.28

Tabelle 33: Geschätzte Bereiche der Treibhausgasemissionen und des Primärenergieaufwands von Batterie-Elektrofahrzeugen (BEV) für erneuerbaren Strom

COMPARISON		GHG [gCO ₂ eq/km]	PED [kWh/km]	PED _{foss} [kWh/km]
BEV_electr.,hydro,EU28	2019	50 to 60	0.42 to 0.52	0.17 to 0.27
	2030	32 to 42	0.35 to 0.45	0.12 to 0.22
	2050	15 to 25	0.27 to 0.37	0.060 to 0.16
BEV_electr.,wind,EU28	2019	51 to 61	0.43 to 0.53	0.17 to 0.27
	2030	33 to 43	0.36 to 0.46	0.12 to 0.22
	2050	16 to 26	0.27 to 0.37	0.060 to 0.16
BEV_electr.,PV,EU28	2019	62 to 72	0.5 to 0.60	0.21 to 0.31
	2030	44 to 54	0.43 to 0.53	0.16 to 0.26
	2050	25 to 35	0.33 to 0.43	0.10 to 0.20

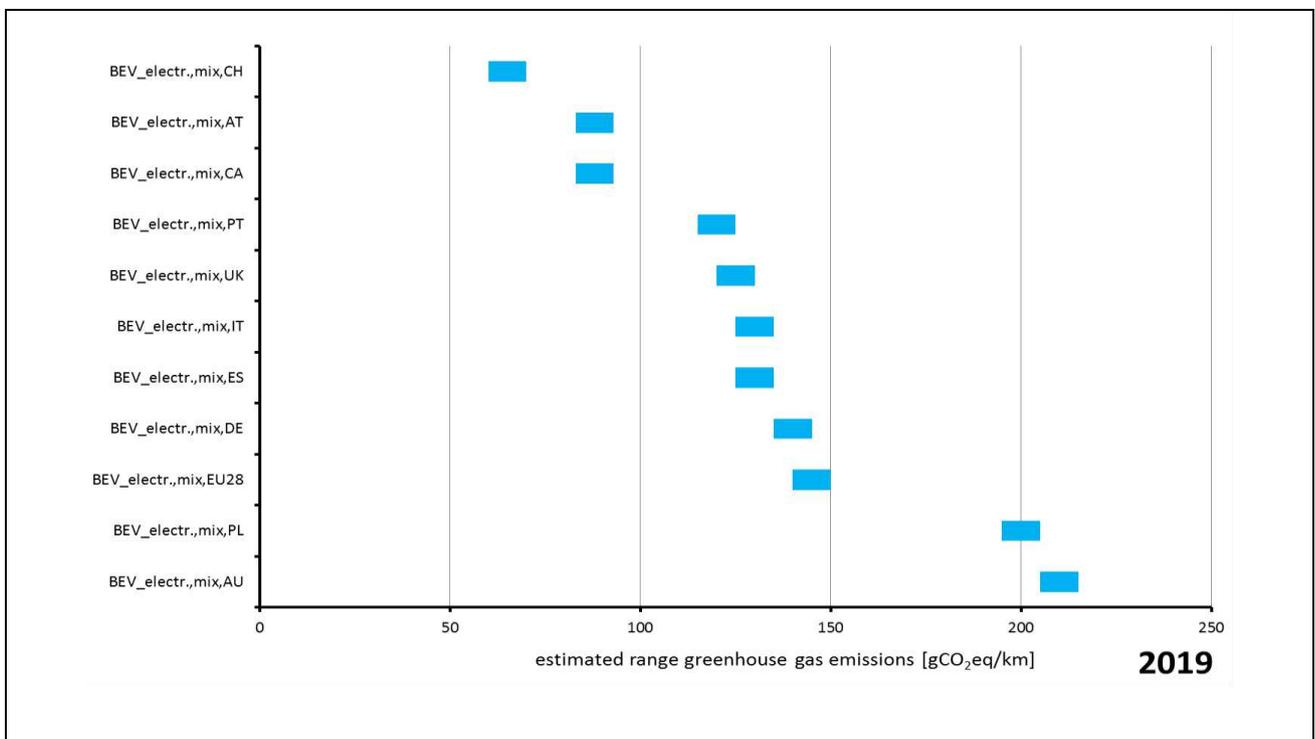


Abbildung 30: Geschätzte Bereiche der Treibhausgasemissionen von Batterie-Elektrofahrzeugen (BEV) für die betrachteten Länder

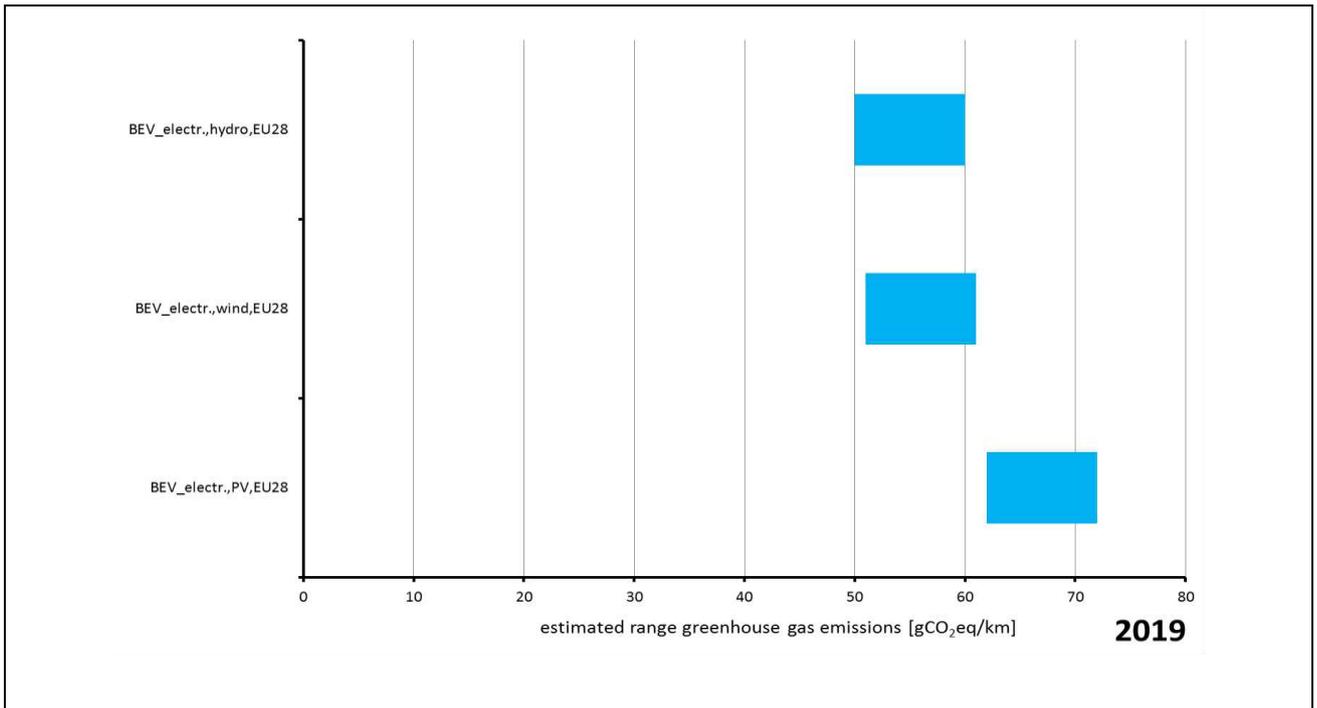


Abbildung 31: Geschätzte Bereiche der Treibhausgasemissionen von Batterie-Elektrofahrzeugen (BEV) bei erneuerbarem Strom

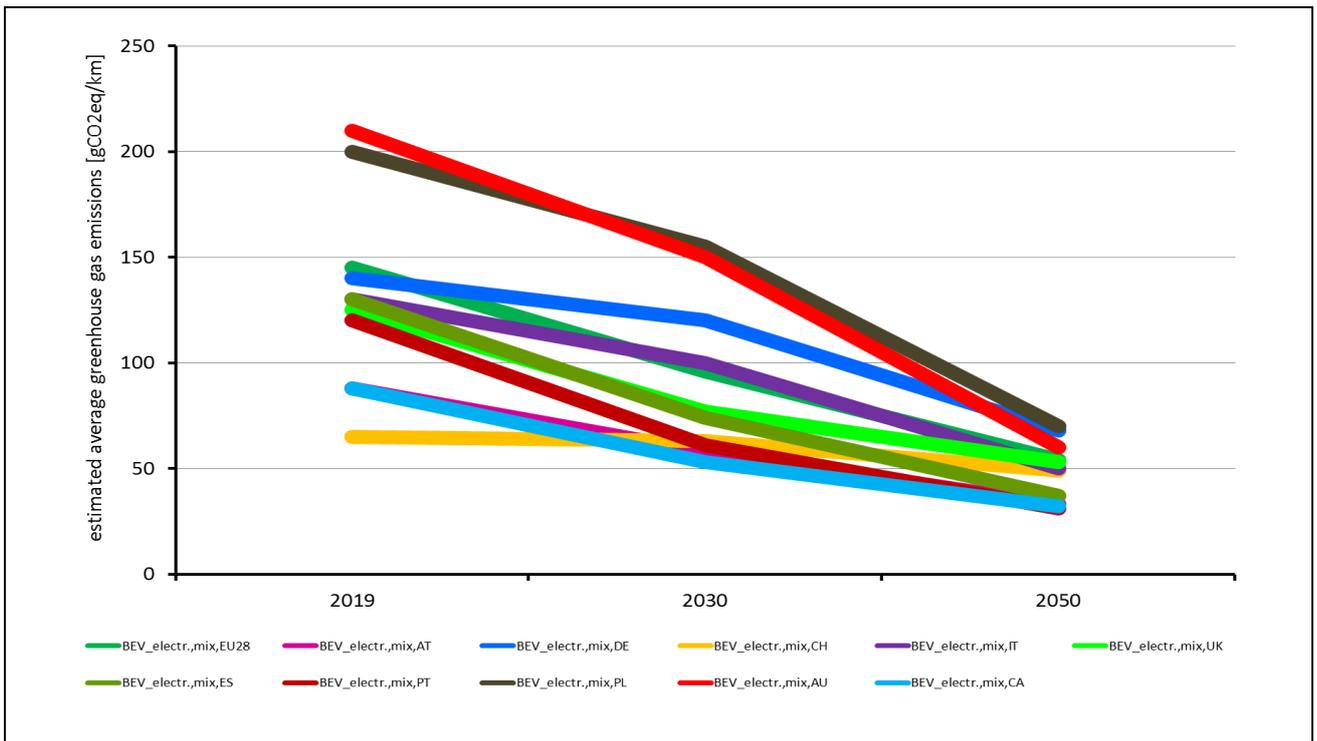


Abbildung 32: Mögliche Entwicklung der geschätzten durchschnittlichen Treibhausgasemissionen von Batterie-Elektrofahrzeugen (BEV) für die betrachteten Länder

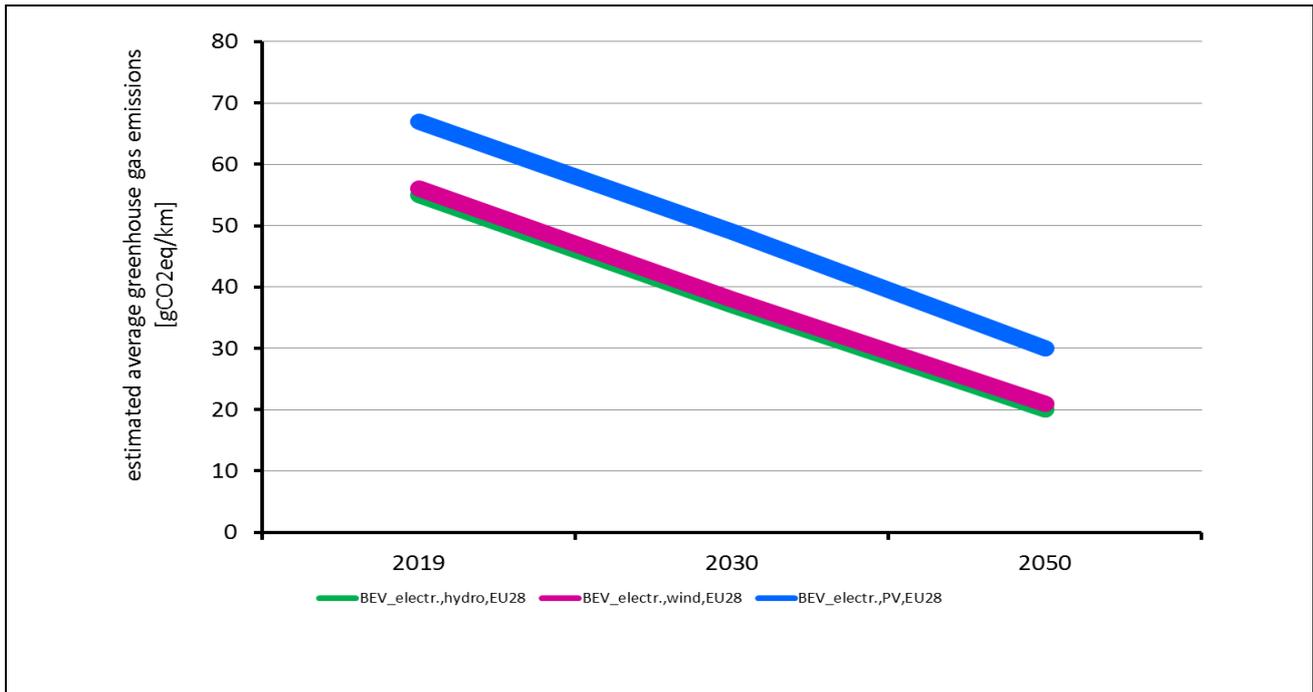


Abbildung 33: Mögliche Entwicklung der geschätzten durchschnittlichen Treibhausgasemissionen von Batterie-Elektrofahrzeugen (BEV) bei erneuerbarem Strom

6.5 Wasserstoffbrennstoffzellen-Fahrzeug (HFCV)

In [Tabelle 34](#) sind die geschätzten Bereiche der Treibhausgasemissionen und der Primärenergie für HFCV dargestellt. Die geschätzten durchschnittlichen Treibhausgasemissionen von HFCV im Jahr 2019 zeigt **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden..**

Mit der aktuellen Technologie – Erdgas statt Wasserstoff – liegen die Treibhausgasemissionen von HFCV bei über 150 g CO₂-Äq./km. Mit künftigen Technologien werden alle HFCV Treibhausgasemissionen von weniger als 150 g CO₂-Äq./km haben. Bei Wasserstoff aus erneuerbarem Strom (außer PV mit aktueller Technologie) liegen die Treibhausgasemissionen bei unter 70 g CO₂-Äq./km. Künftig werden die Treibhausgasemissionen von HFCV weniger als 30 g CO₂-Äq./km betragen, wenn der Wasserstoff aus durch Wind- und Wasserkraft erzeugtem Strom gewonnen wird.

Der geschätzte durchschnittliche Primärenergieaufwand von HFCV im Jahr 2019 zeigt, dass Wasserstoff aus der PV einen höheren Primärenergieaufwand hat als Wasserstoff aus Wasser- und Windkraft. Der kumulierte Primärenergieaufwand von Wasserstoff aus Erdgas ist geringer als der von Wasserstoff aus Wasserkraft, Windkraft und PV. Der geschätzte durchschnittliche fossile Primärenergieaufwand von HFCV im Jahr 2019 zeigt, dass Wasserstoff aus Erdgas den höchsten und aus Wasserkraft den niedrigsten Primärenergieverbrauch aufweist. Der fossile Primärenergieverbrauch für Wasserstoff aus Windkraft ist vergleichbar mit Wasserstoff aus

Wasserkraft. Für Wasserstoff aus der PV ist der fossile Primärenergieverbrauch höher als für Wasserstoff aus Wasserkraft, aber deutlich niedriger als für Wasserstoff aus Erdgas.

In **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** ist die mögliche Entwicklung der geschätzten durchschnittlichen Treibhausgasemissionen von HFCV dargestellt, die aufgrund von Verbesserungen der Energieeffizienz voraussichtlich deutlich zurückgehen werden.

Tabelle 34: Geschätzte Bereiche der Treibhausgasemissionen und des Primärenergieaufwands von Wasserstoffbrennstoffzellen-Fahrzeugen (HFCV)

COMPARISON		GHG [gCO ₂ eq/km]	PED [kWh/km]	PED _{foss} [kWh/km]
HFC_H2,natural gas,EU28	2019	170 to 180	0.81 to 0.91	0.76 to 0.86
	2030	120 to 130	0.64 to 0.74	0.59 to 0.69
	2050	84 to 94	0.41 to 0.51	0.37 to 0.47
HFC_H2,hydro,EU28	2019	46 to 56	0.83 to 0.93	0.14 to 0.24
	2030	28 to 38	0.68 to 0.78	0.090 to 0.19
	2050	15 to 25	0.52 to 0.62	0.040 to 0.14
HFC_H2,wind,EU28	2019	49 to 59	0.85 to 0.95	0.15 to 0.25
	2030	31 to 41	0.69 to 0.79	0.090 to 0.19
	2050	17 to 27	0.53 to 0.63	0.046 to 0.15
HFC_H2,PV,EU28	2019	80 to 90	0.97 to 1.1	0.26 to 0.36
	2030	52 to 62	0.79 to 0.89	0.19 to 0.29
	2050	32 to 42	0.61 to 0.71	0.12 to 0.22

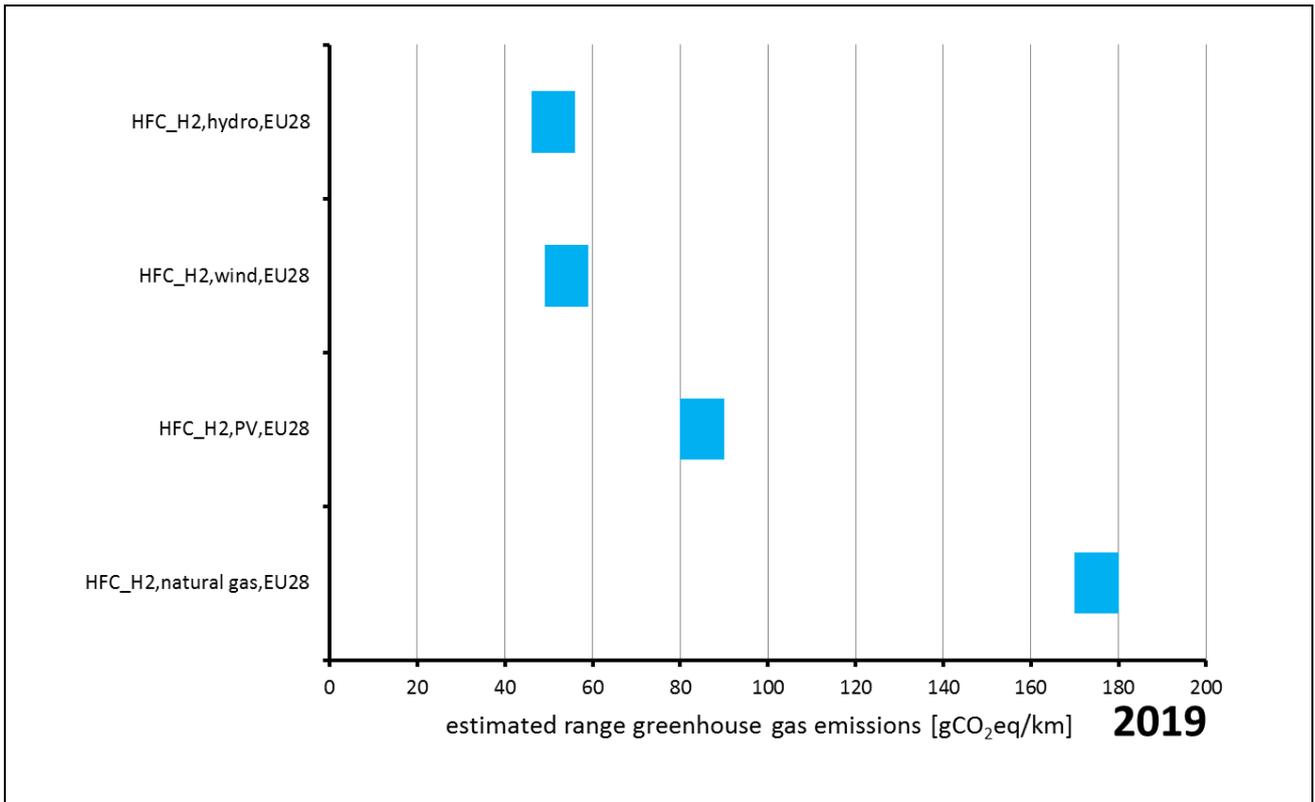


Abbildung 34: Geschätzte Bereiche der Treibhausgasemissionen von Wasserstoffbrennstoffzellen-Fahrzeugen (HFCV) für 2019

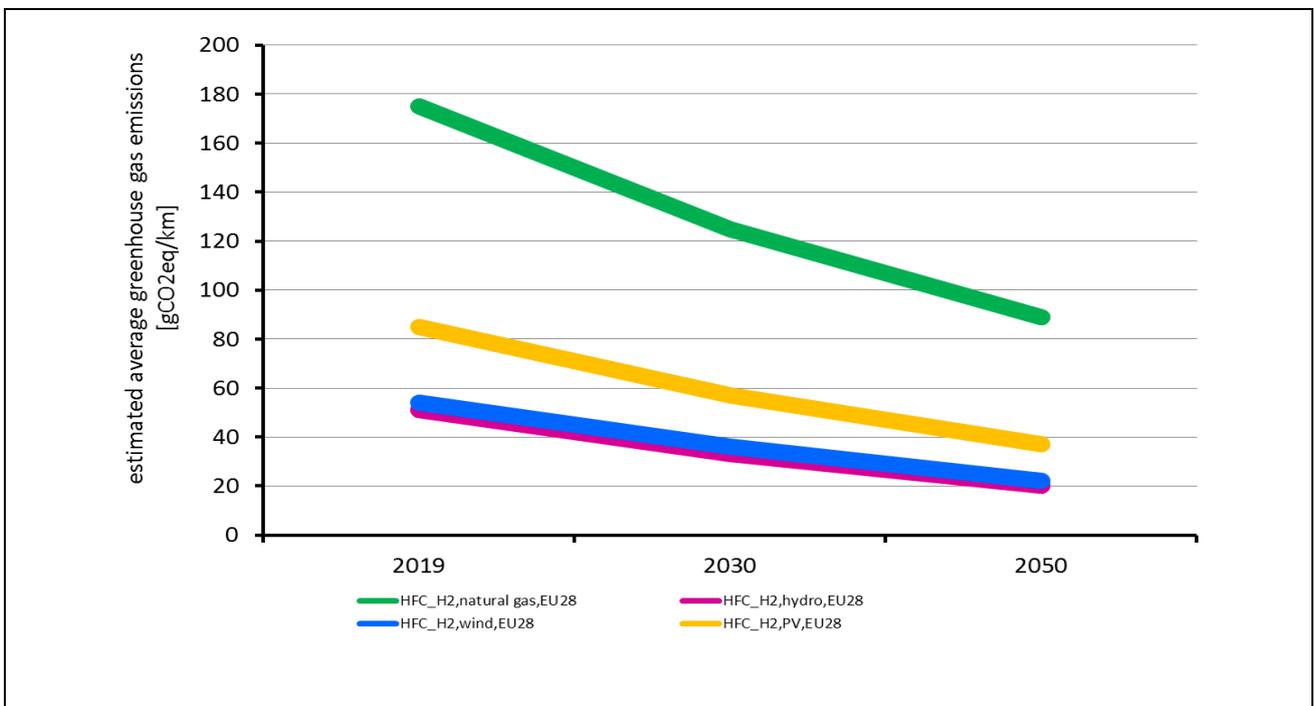


Abbildung 35: Mögliche Entwicklung der geschätzten durchschnittlichen Treibhausgasemissionen von Wasserstoffbrennstoffzellen-Fahrzeugen (HFCV)

6.6 Biokraftstoff-Verbrennerfahrzeug (ICEV)

In [Tabelle 35](#) sind die geschätzten Bereiche der Treibhausgasemissionen und der Primärenergie für Biokraftstoff-ICEV dargestellt, wobei alle Biokraftstoffe einen Mix aus verschiedenen Arten von Biomasse-Ressourcen verwenden (siehe Kapitel 5.3.3). Die geschätzten durchschnittlichen Treibhausgasemissionen von Biokraftstoff-HFCV im Jahr 2019 sind in [Abbildung 36](#) dargestellt.

Nur Bioethanol mit aktueller Technologie, die landwirtschaftliche Nutzpflanzen als Rohstoff und fossile Energie zur Verarbeitung verwendet, weist Treibhausgasemissionen von über 150 g CO₂-Äq./km auf. Bei allen anderen Biokraftstoffen liegen die Treibhausgasemissionen zwischen 70 g CO₂-Äq./km und 150 g CO₂-Äq./km, wobei FT-Diesel und CRG bei aktueller Technologie sogar Treibhausgasemissionen von weniger als 70 g CO₂-Äq./km aufweisen.

Der geschätzte durchschnittliche Primärenergieaufwand für Biokraftstoff-ICEV im Jahr 2019 zeigt, dass EtOH den höchsten Primärenergieverbrauch hat. Der kumulierte Primärenergieverbrauch aller anderen Biokraftstoffe liegt nahezu im gleichen Bereich.

Der geschätzte durchschnittliche fossile Primärenergieaufwand für mit Biokraftstoffen betriebene ICEV im Jahr 2019 zeigt, dass EtOH den höchsten fossilen Primärenergieverbrauch hat, da fossile Brennstoffe für Prozesswärme verwendet werden, und FT-Diesel den geringsten fossilen Primärenergieaufwand hat.

In [Abbildung 37](#) ist die mögliche Entwicklung der geschätzten durchschnittlichen Treibhausgasemissionen für ICEV dargestellt. Durch den Umstieg bei biogenen Rohstoffen zu Holz und Stroh und die zunehmende Energieeffizienz der ICE werden die Treibhausgasemissionen voraussichtlich deutlich sinken.

Tabelle 35: Geschätzte Bereiche der Treibhausgasemissionen und des Primärenergieaufwands von Biokraftstoff-Verbrennerfahrzeugen (ICEV)

COMPARISON		GHG [gCO ₂ eq/km]	PED [kWh/km]	PED _{foss} [kWh/km]
ICE_FAME,mix,EU28	2019	110 to 120	1.1 to 1.2	0.23 to 0.33
	2030	92 to 100	0.95 to 1.1	0.21 to 0.31
	2050	71 to 81	0.76 to 0.86	0.15 to 0.25
ICE_HVO,mix,EU28	2019	125 to 135	1.2 to 1.3	0.29 to 0.39
	2030	100 to 110	1 to 1.1	0.25 to 0.35
	2050	76 to 86	0.82 to 0.92	0.18 to 0.28
ICE_EtOH,mix,EU28	2019	170 to 180	1.8 to 1.9	0.56 to 0.66
	2030	125 to 135	1.5 to 1.6	0.47 to 0.57
	2050	78 to 88	1.2 to 1.3	0.30 to 0.40
ICE_FT-diesel,mix,EU28	2019	52 to 62	1.1 to 1.2	0.13 to 0.23
	2030	40 to 50	0.89 to 0.99	0.14 to 0.24
	2050	27 to 37	0.68 to 0.78	0.10 to 0.20
ICE_CRG,mix,EU28	2019	62 to 72	1.2 to 1.3	0.36 to 0.46
	2030	38 to 48	1 to 1.1	0.29 to 0.39
	2050	19 to 29	0.72 to 0.82	0.19 to 0.29

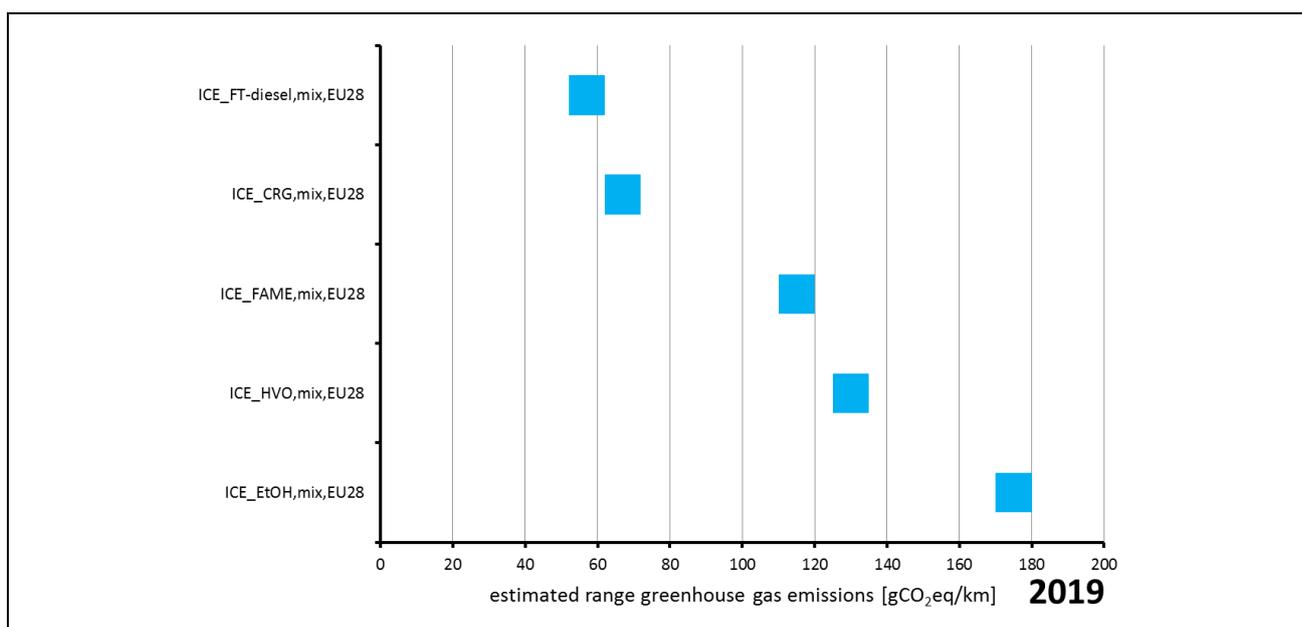


Abbildung 36: Geschätzte Bereiche der Treibhausgasemissionen von Biokraftstoff-Verbrennerfahrzeugen (ICEV) für 2019

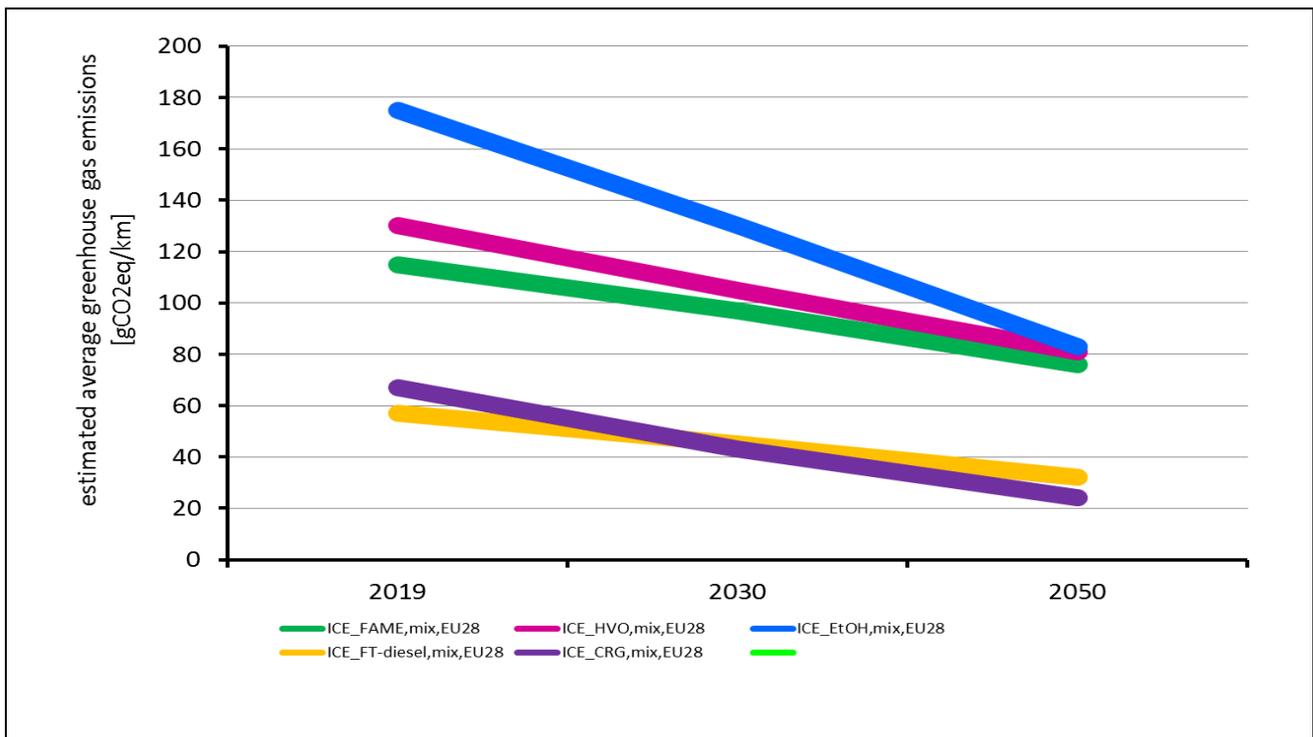


Abbildung 37: Mögliche Entwicklung der geschätzten durchschnittlichen Treibhausgasemissionen von Biokraftstoff-Verbrennerfahrzeugen (ICEV)

6.7 E-Fuel-Verbrennerfahrzeuge (ICEV)

In [Tabelle 36](#) sind die geschätzten Bereiche der Treibhausgasemissionen und der Primärenergie für FT-Diesel und in [Tabelle 37](#) für CRG als E-Fuel-ICEV dargestellt. Die geschätzten durchschnittlichen Treibhausgasemissionen von E-Fuel-ICEV sind für FT-Diesel in [Abbildung 39](#) und für CRG in [Abbildung 39](#) dargestellt.

Mit der aktuellen Technologie liegen die Treibhausgasemissionen unter Berücksichtigung des EU-28-Strommixes deutlich über 150 g CO₂-Äq./km, selbst Benzin und Diesel haben niedrigere Treibhausgasemissionen. Wenn erneuerbarer Strom für die E-Fuel-Produktion verwendet wird, liegen die Treibhausgasemissionen unter 70 g CO₂-Äq./km, aber nicht, wenn CO₂ aus der Atmosphäre mit aktueller Technologie verwendet wird. Da die CO₂-Konzentration in industriellem Abgas mit 10 - 15 Vol.-% höher ist als in der Luft (400 ppm = 0,04 %), wird weniger Energie für die CO₂-Abscheidung benötigt, die direkt mit dem Energieaufwand der E-Fuels verbunden ist. Der Primärenergieaufwand von E-Fuels, die Biomasse als CO₂-Quelle nutzen, ist aufgrund der geringen Energiedichte von Biomasse und der Umwandlungseffizienz von Biomasse in FT-Diesel und CRG höher (siehe auch Biokraftstoffe im Kapitel 6.6). Die Unterschiede zwischen FT-Diesel und CRG sind klein und nicht signifikant.

Die mögliche Entwicklung der geschätzten durchschnittlichen Treibhausgasemissionen bei E-Fuels für Verbrennerfahrzeuge (ICEV) ist in [Abbildung 40](#) für FT-Diesel und in [Abbildung 41](#) für CRG dargestellt. Es wird erwartet, dass die Treibhausgasemissionen durch den EU-28-Strommix aufgrund des stark steigenden Anteils von Strom aus erneuerbaren Energien in Europa künftig deutlich sinken werden. Wenn bereits erneuerbarer Strom verwendet wird, ist nur eine geringere Reduzierung der Treibhausgasemissionen zu erwarten, die hauptsächlich auf die zunehmende Energieeffizienz des ICE zurückzuführen ist.

Tabelle 36: Geschätzte Bereiche der Treibhausgasemissionen und des Primärenergieaufwands von FT-Diesel als E-Fuel für Verbrennerfahrzeuge (ICEV)

COMPARISON		GHG [gCO ₂ eq/km]	PED [kWh/km]	PED _{foss} [kWh/km]
ICE_E-fuel FT- diesel,wind&CO2ind,EU28	2019	46 to 56	1.36 to 1.46	0.13 to 0.23
	2030	33 to 43	1.17 to 1.27	0.1 to 0.2
	2050	20 to 30	0.92 to 1.02	0.05 to 0.15
ICE_E-fuel FT- diesel,wind&CO2air,EU28	2019	180 to 190	2.07 to 2.17	0.78 to 0.88
	2030	95 to 105	1.59 to 1.69	0.47 to 0.57
	2050	53 to 63	1.17 to 1.27	0.26 to 0.36
ICE_E-fuel FT- diesel,wind&biomass,EU28	2019	52 to 62	2.3 to 2.4	0.13 to 0.23
	2030	41 to 51	2.12 to 2.22	0.1 to 0.2
	2050	27 to 37	1.75 to 1.85	0.06 to 0.16
ICE_E-fuel FT- diesel,eumix&CO2ind,EU28	2019	540 to 550	3.16 to 3.26	2.64 to 2.74
	2030	285 to 295	2.46 to 2.56	1.83 to 1.93
	2050	140 to 150	1.75 to 1.85	1.11 to 1.21
ICE_E-fuel FT- diesel,eumix&CO2air,EU28	2019	675 to 685	3.86 to 3.96	3.29 to 3.39
	2030	350 to 360	2.88 to 2.98	2.2 to 2.3
	2050	170 to 180	2 to 2.1	1.33 to 1.43
ICE_E-fuel FT- diesel,eumix&biomass,EU28	2019	515 to 525	3.98 to 4.08	2.47 to 2.57
	2030	280 to 290	3.27 to 3.37	1.74 to 1.84
	2050	140 to 150	2.45 to 2.55	1.07 to 1.17

Tabelle 37: Geschätzte Bereiche der Treibhausgasemissionen und des Primärenergieaufwands von CRG als E-Fuel für Verbrennerfahrzeuge (ICEV)

COMPARISON		GHG [gCO ₂ eq/km]	PED [kWh/km]	PED _{foss} [kWh/km]
ICE_E-fuel CRG,wind&CO2ind,EU28	2019	43 to 53	1.46 to 1.56	0.12 to 0.22
	2030	31 to 41	1.28 to 1.38	0.09 to 0.19
	2050	19 to 29	1 to 1.1	0.045 to 0.15
ICE_E-fuel CRG,wind&CO2air,EU28	2019	150 to 160	2.02 to 2.12	0.64 to 0.74
	2030	82 to 92	1.61 to 1.71	0.38 to 0.48
	2050	45 to 55	1.21 to 1.31	0.21 to 0.31
ICE_E-fuel CRG,wind&biomass,EU28	2019	51 to 61	2.55 to 2.65	0.12 to 0.22
	2030	40 to 50	2.27 to 2.37	0.1 to 0.2
	2050	26 to 36	1.82 to 1.92	0.06 to 0.16
ICE_E-fuel CRG,eumix&CO2ind,EU28	2019	585 to 595	3.43 to 3.53	2.87 to 2.97
	2030	310 to 320	2.7 to 2.8	2.02 to 2.12
	2050	150 to 160	1.93 to 2.03	1.23 to 1.33
ICE_E-fuel CRG,eumix&CO2air,EU28	2019	695 to 705	3.99 to 4.09	3.39 to 3.49
	2030	365 to 375	3.03 to 3.13	2.31 to 2.41
	2050	175 to 185	2.13 to 2.23	1.4 to 1.5
ICE_E-fuel CRG,eumix&biomass,EU28	2019	610 to 620	4.58 to 4.68	2.96 to 3.06
	2030	330 to 340	3.73 to 3.83	2.08 to 2.18
	2050	160 to 170	2.77 to 2.87	1.27 to 1.37

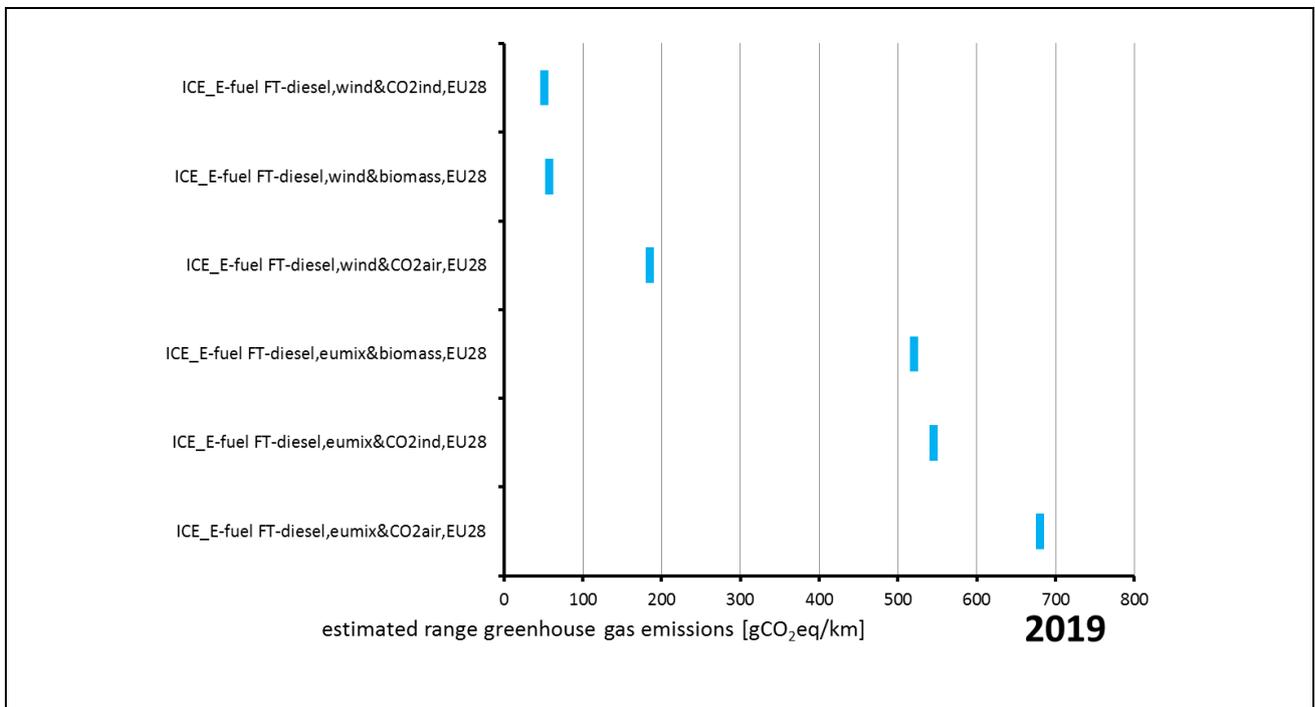


Abbildung 38: Geschätzte Bereiche der Treibhausgasemissionen von FT-Diesel als E-Fuel für Verbrennerfahrzeuge (ICEV) für 2019

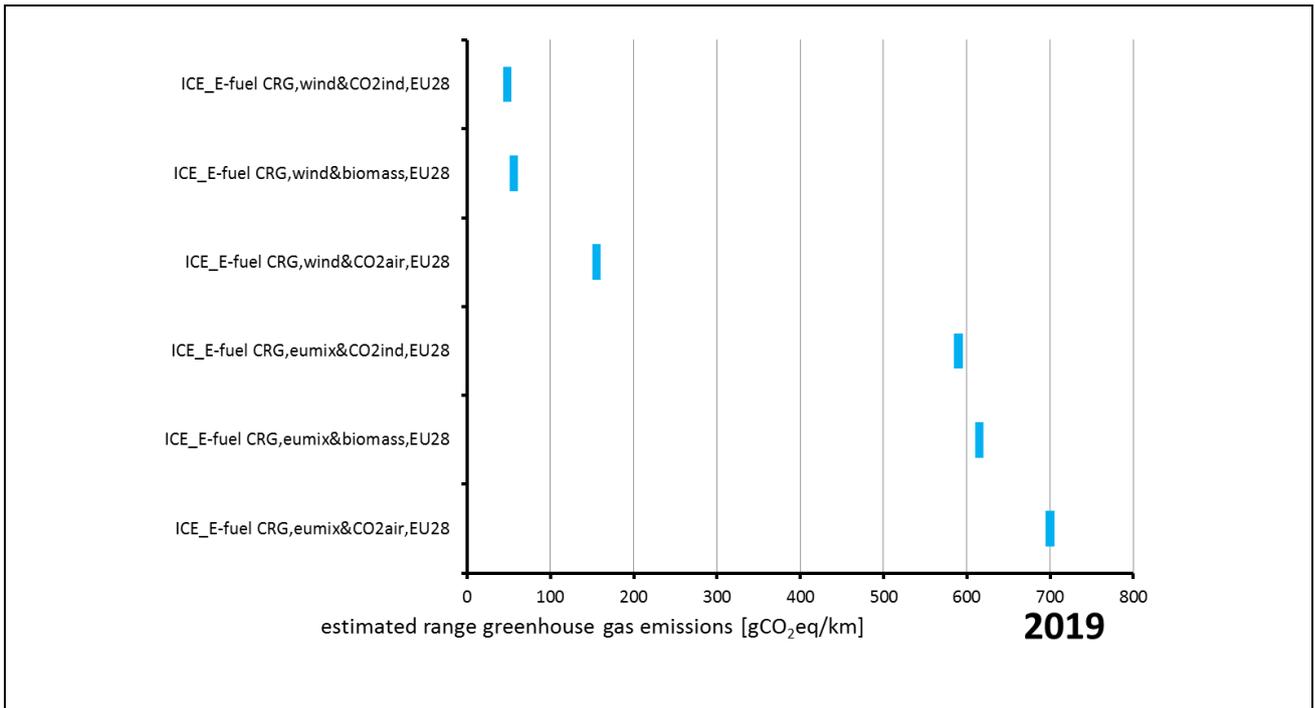


Abbildung 39: Geschätzte Bereiche der Treibhausgasemissionen von CRG als E-Fuel für Biokraftstoff-Verbrennerfahrzeuge (ICEV) für 2019

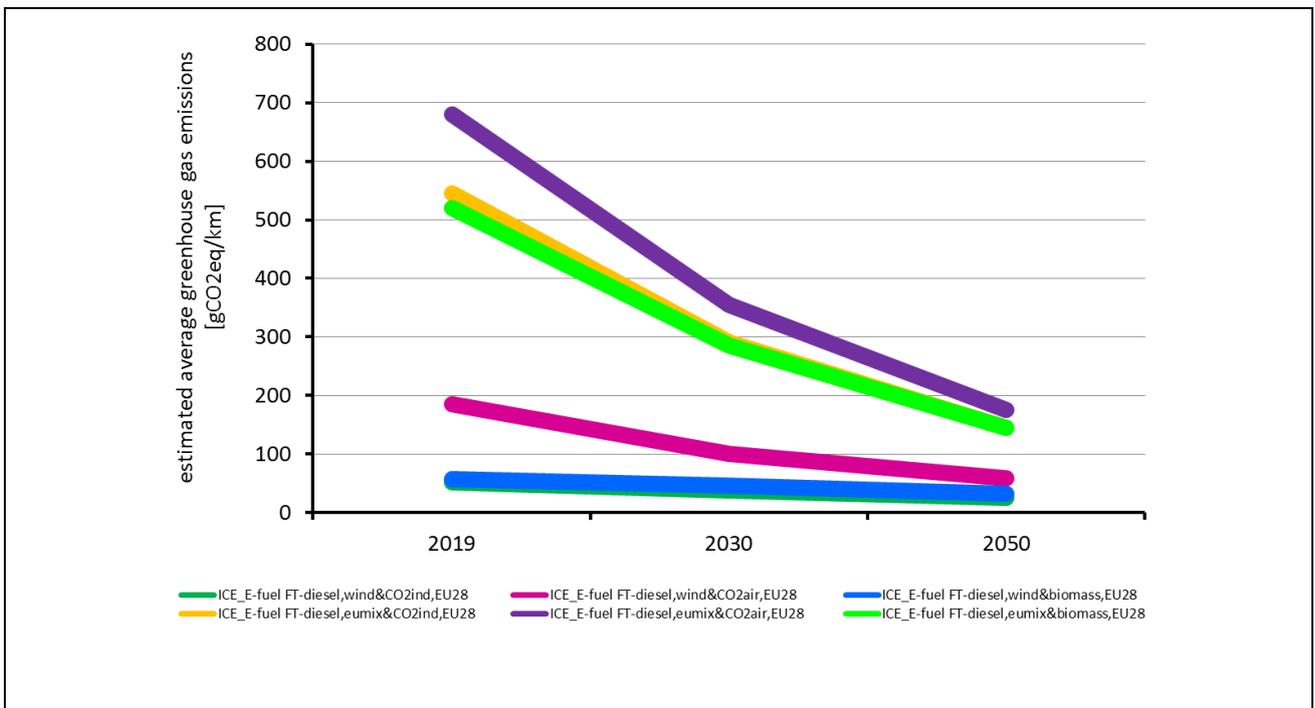


Abbildung 40: Mögliche Entwicklung der geschätzten durchschnittlichen Treibhausgasemissionen von FT-Diesel als E-Fuel für Verbrennerfahrzeuge (ICEV)

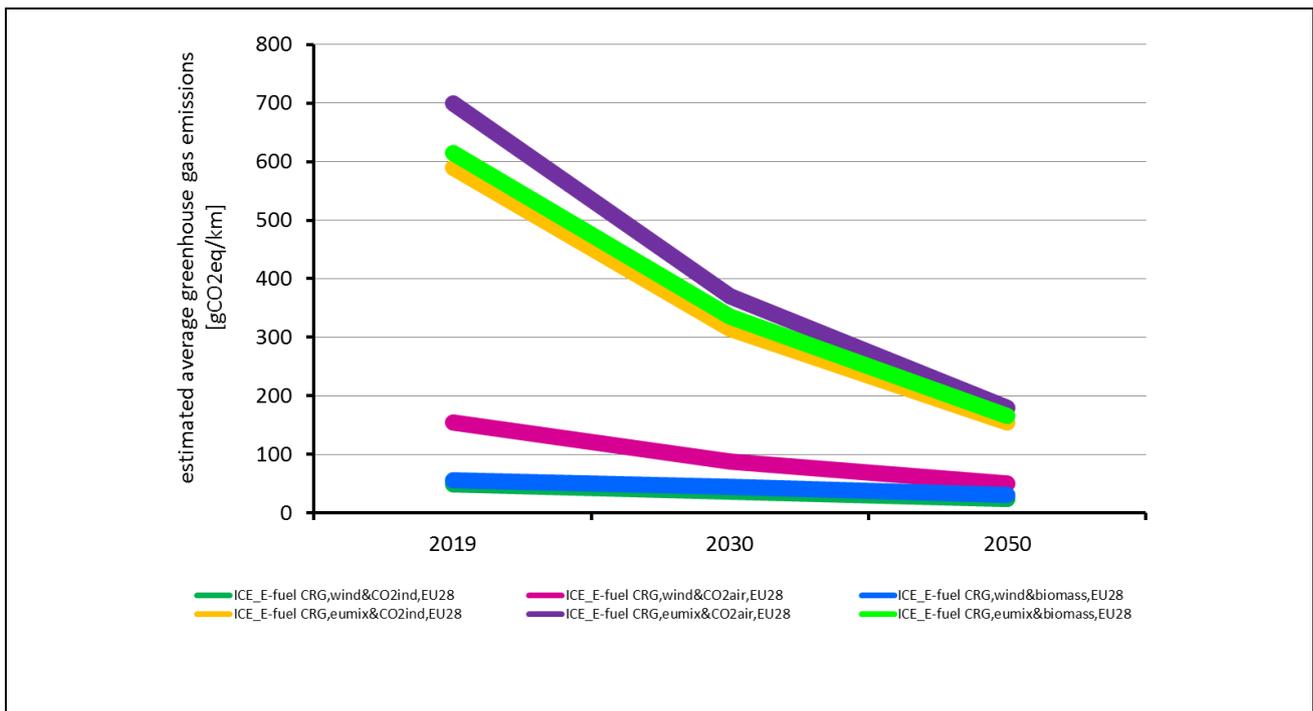


Abbildung 41: Mögliche Entwicklung der geschätzten durchschnittlichen Treibhausgasemissionen von CRG als E-Fuel für Verbrennerfahrzeuge (ICEV)

6.8 Systemvergleich für die EU-28

In diesem Kapitel werden ausgewählte Verkehrssysteme für die EU-28 verglichen, um die Hauptunterschiede zwischen den in den vorhergehenden Kapiteln präsentierten Systemergebnissen festzustellen und aufzuzeigen. Die Auswahl beinhaltet immer einen Vergleich zwischen den folgenden sechs Verkehrssystemen:

1. Verbrennerfahrzeug (ICEV) mit fossilem Kraftstoff (einschl. Beimischung von Biokraftstoffen):
2. Plug-in-Hybrid (PHEV)
3. Batterie-Elektrofahrzeug (BEV)
4. Wasserstoffbrennstoffzellen-Fahrzeug (HFCV)
5. Biokraftstoff-Verbrennerfahrzeug (ICEV)
6. E-Fuel-Verbrennerfahrzeug (ICEV)

6.8.1 Vergleich von Treibhausgasemissionen und Energiebedarf pro Kilometer

In Tabelle 38 sind die geschätzten Bereiche der Treibhausgasemissionen und des Primärenergieaufwands von ausgewählten Verkehrssystemen dargestellt.

In Abbildung 42 ist der Vergleich des geschätzten Bereichs der Treibhausgasemissionen, in Abbildung 43 des geschätzten Bereichs des kumulierten Primärenergieaufwands und in Abbildung 44 des geschätzten Bereichs des kumulierten fossilen Primärenergieaufwands für ausgewählte Verkehrssysteme (2019) in den EU-28 dargestellt.

Nach dem derzeitigen Stand der Technik weisen die Systeme, die fossile Energie in ICE- und Brennstoffzellen-Fahrzeugen nutzen, Treibhausgasemissionen von über 150 g CO₂-Äq./km auf. Systeme, die einen hohen Anteil an erneuerbaren Energien nutzen, haben Treibhausgasemissionen von weniger als 70 g CO₂-Äq./km. Bei künftigen Technologien wird erwartet, dass alle diese ausgewählten Systeme aufgrund der erwarteten Steigerung der Energieeffizienz und des höheren Anteils erneuerbarer Energien geringere Treibhausgasemissionen aufweisen. Längerfristig gesehen haben alle Systeme, die erneuerbare Energien nutzen, das Potenzial für sehr niedrige Treibhausgasemissionen, bei denen die Unterschiede zwischen den Systemen fast verschwinden.

Für die künftigen Systeme mit niedrigen Treibhausgasemissionen wird der kumulierte Primärenergieaufwand also immer relevanter, wenn die aus Nachhaltigkeitsgründen und gesellschaftlichen Aspekten ohnehin begrenzte erneuerbare Primärenergie möglichst effizient genutzt werden soll. Das Batterie-Elektrofahrzeug mit erneuerbarer Energie hat den geringsten Primärenergieaufwand, gefolgt von Wasserstoff und E-Fuels.

Abbildung 45 zeigt den Vergleich der möglichen Entwicklung der geschätzten durchschnittlichen Treibhausgasemissionen, Abbildung 46 den kumulierten Primärenergieaufwand ausgewählter Verkehrssysteme in den EU-28.

Tabelle 38: Geschätzte Bereiche der Treibhausgasemissionen und des Primärenergieaufwands für die ausgewählten Verkehrssysteme

COMPARISON		GHG [gCO ₂ e q/km]	PED [kWh/km]	PED _{foss} [kWh/km]
ICE_petrol,raw oil,EU28	2019	230 to 240	0.84 to 0.94	0.82 to 0.92
	2030	200 to 210	0.77 to 0.87	0.75 to 0.85
	2050	165 to 175	0.66 to 0.76	0.64 to 0.74
ICE_diesel,raw oil,EU28	2019	185 to 195	0.67 to 0.77	0.65 to 0.75
	2030	165 to 175	0.62 to 0.72	0.60 to 0.70
	2050	135 to 145	0.52 to 0.62	0.51 to 0.61
ICE_CNG,natural gas,EU28	2019	175 to 185	0.78 to 0.88	0.77 to 0.87
	2030	155 to 165	0.70 to 0.80	0.68 to 0.78
	2050	125 to 135	0.46 to 0.56	0.45 to 0.55
ICE_FT-diesel,mix,EU28	2019	52 to 62	1.1 to 1.2	0.13 to 0.23
	2030	40 to 50	0.89 to 0.99	0.14 to 0.24
	2050	27 to 37	0.68 to 0.78	0.10 to 0.20
ICE_CRG,mix,EU28	2019	62 to 72	1.2 to 1.3	0.36 to 0.46
	2030	38 to 48	1 to 1.1	0.29 to 0.39
	2050	19 to 29	0.72 to 0.82	0.19 to 0.29
HFC_H2,natural gas,EU28	2019	170 to 180	0.81 to 0.91	0.76 to 0.86
	2030	120 to 130	0.64 to 0.74	0.59 to 0.69
	2050	84 to 94	0.41 to 0.51	0.37 to 0.47
HFC_H2,wind,EU28	2019	49 to 59	0.85 to 0.95	0.15 to 0.25
	2030	31 to 41	0.69 to 0.79	0.09 to 0.19
	2050	17 to 27	0.53 to 0.63	0.04 to 0.15
ICE_E-fuel FT-diesel,wind&CO2ind,EU28	2019	46 to 56	1.4 to 1.5	0.13 to 0.23
	2030	33 to 43	1.2 to 1.3	0.10 to 0.20
	2050	20 to 30	0.92 to 1	0.05 to 0.15
PHEV_petrol&el,raw oil&el,EU28	2019	175 to 185	0.76 to 0.86	0.68 to 0.78
	2030	135 to 145	0.65 to 0.75	0.56 to 0.66
	2050	100 to 110	0.5 to 0.60	0.42 to 0.52
BEV_electr.,mix,EU28	2019	140 to 150	0.75 to 0.85	0.62 to 0.72
	2030	91 to 100	0.60 to 0.70	0.45 to 0.55
	2050	49 to 59	0.44 to 0.54	0.28 to 0.38
BEV_electr.,wind,EU28	2019	51 to 61	0.43 to 0.53	0.17 to 0.27
	2030	33 to 43	0.36 to 0.46	0.12 to 0.22
	2050	16 to 26	0.27 to 0.37	0.06 to 0.16

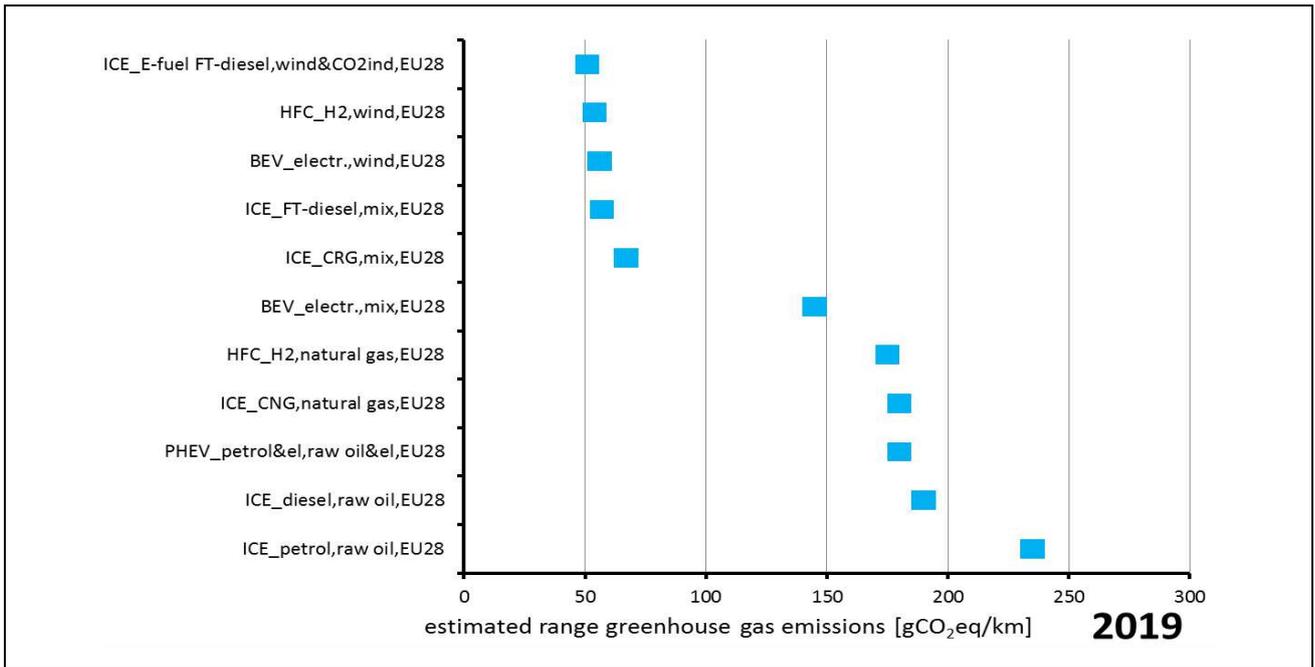


Abbildung 42: Vergleich geschätzter Bereiche der Treibhausgasemissionen ausgewählter Verkehrssysteme in den EU-28 im Jahr 2019

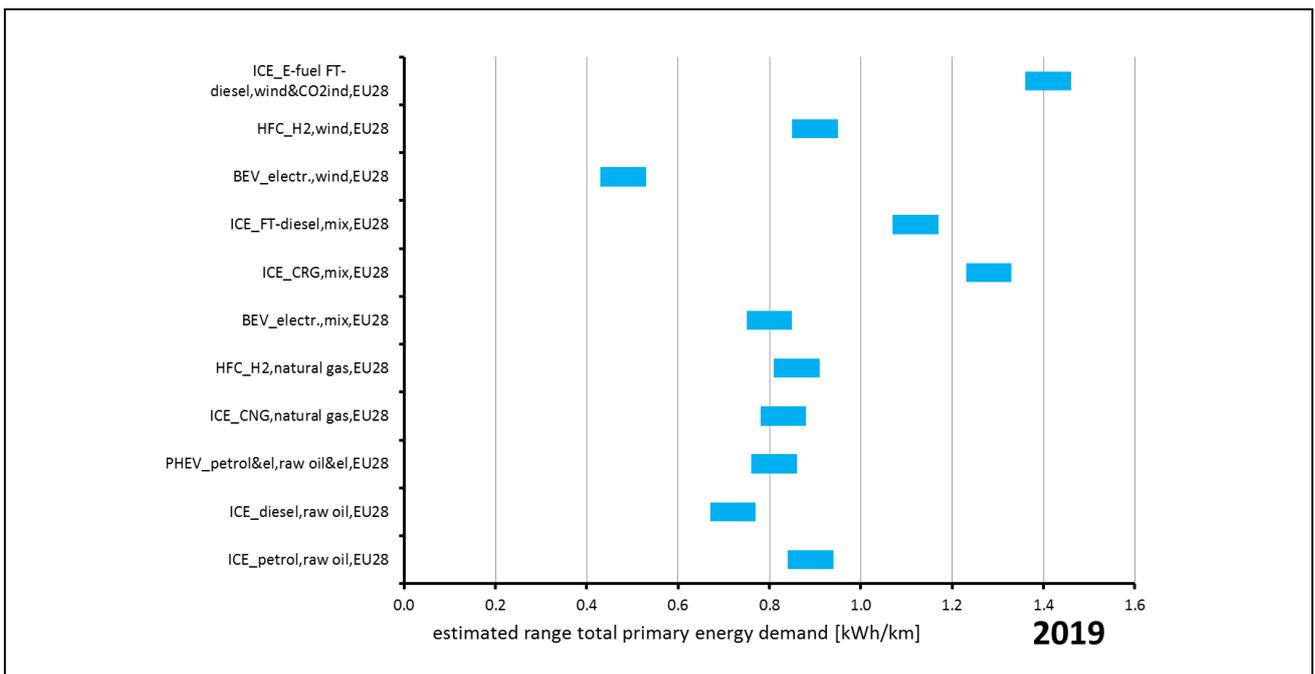


Abbildung 43: Vergleich geschätzter Bereiche des kumulierten Primärenergieaufwands ausgewählter Verkehrssysteme in den EU-28 im Jahr 2019

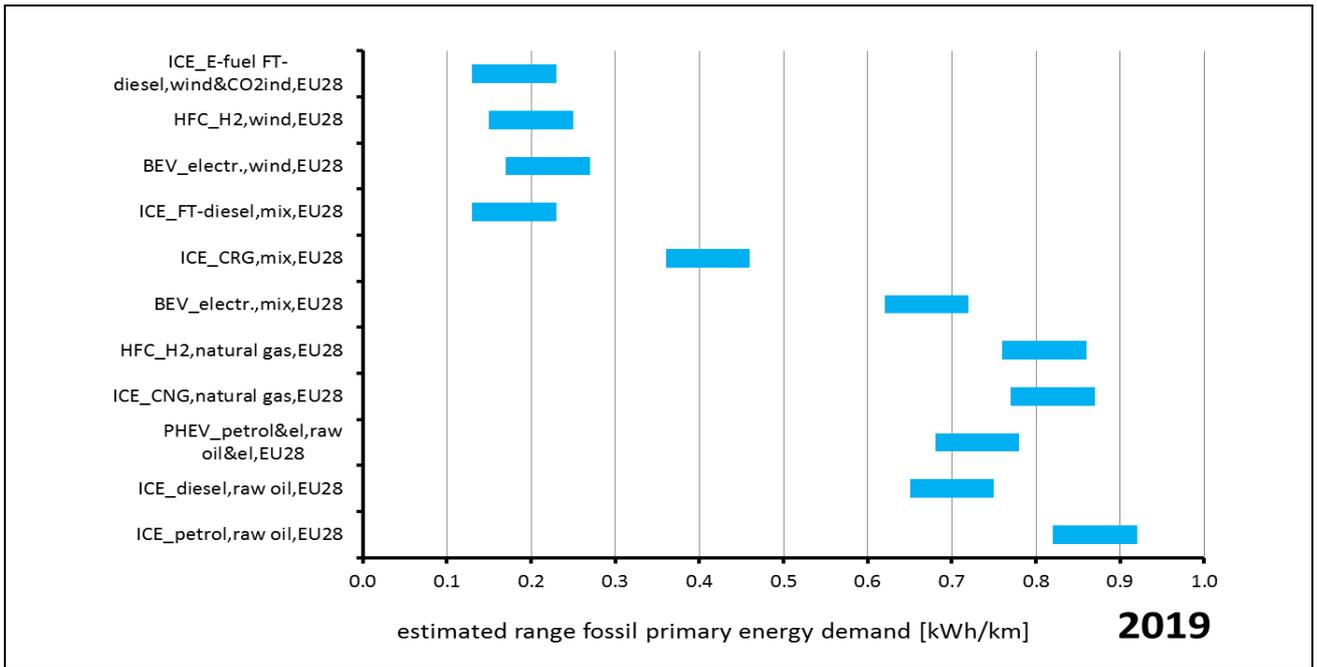


Abbildung 44: Vergleich geschätzter Bereiche des kumulierten fossilen Primärenergieaufwands ausgewählter Verkehrssysteme in den EU-28 (2019)

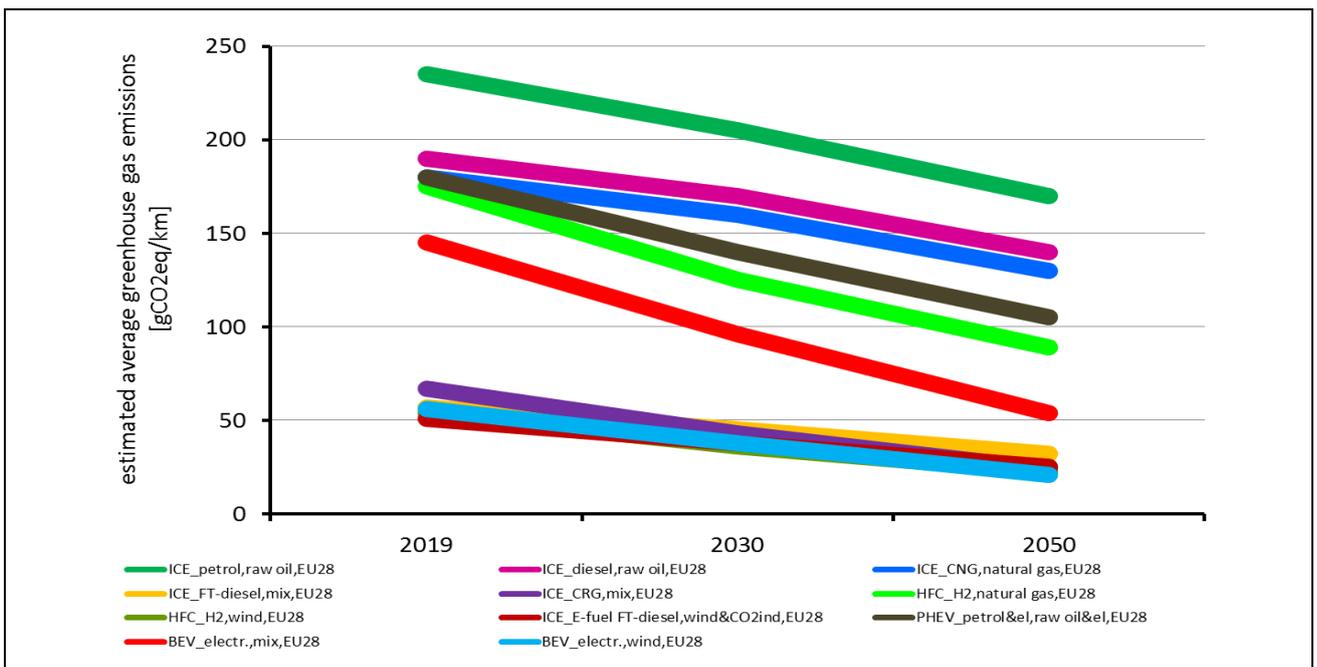


Abbildung 45: Vergleich der möglichen Entwicklung der geschätzten durchschnittlichen Treibhausgasemissionen ausgewählter Verkehrssysteme in den EU-28

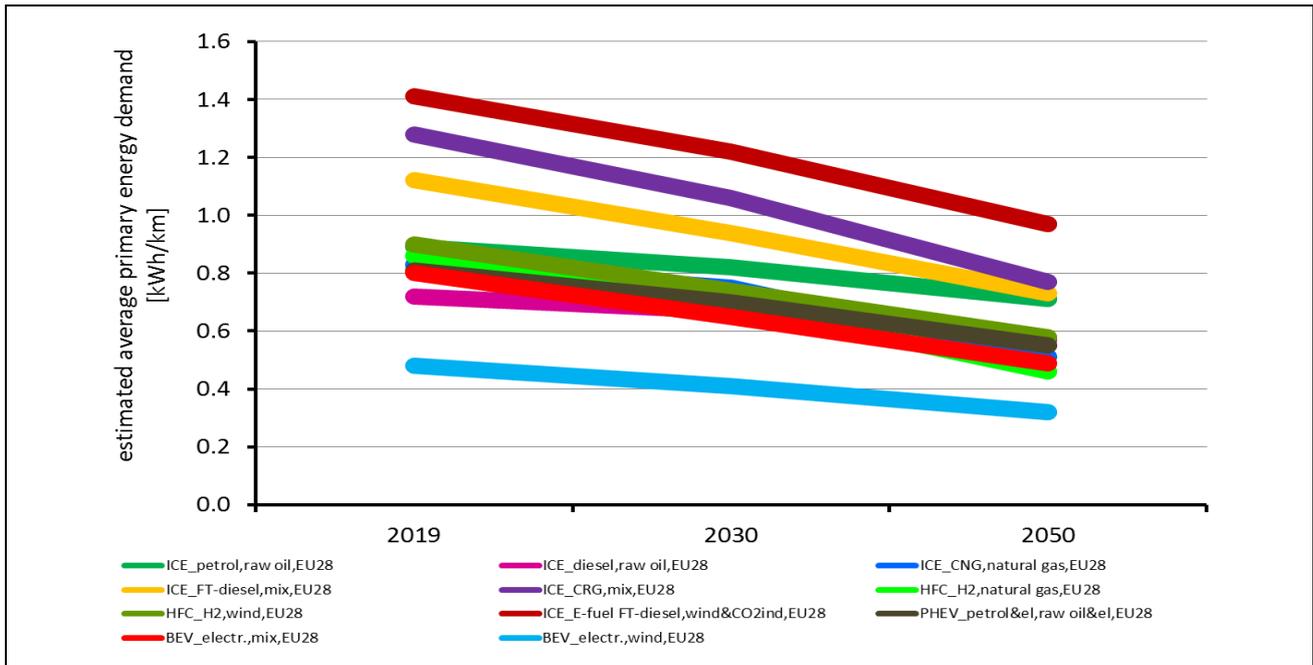


Abbildung 46: Vergleich der möglichen Entwicklung des geschätzten durchschnittlichen Primärenergieaufwands ausgewählter Verkehrssysteme in den EU-28

6.8.2 Vergleich der kumulierten Treibhausgasemissionen über die gesamte Lebensdauer

Abbildung 47 zeigt die geschätzten kumulierten Treibhausgasemissionen von Verbrennerfahrzeugen (ICEV), die flüssige fossile und biogene Kraftstoffe nutzen. Bei Benzin sind die kumulierten Treibhausgasemissionen am höchsten und bei FT-Diesel aus Holz und Stroh am niedrigsten. HVO und FAME liegen mehr oder weniger zwischen Benzin und FT-Diesel. Alle ICE-Fahrzeuge weisen die gleichen Treibhausgasemissionen aus Produktion und Lebensende auf. Die Kraftstoffe auf Basis erneuerbarer Energien weisen während des Betriebs des Fahrzeugs geringere Treibhausgasemissionen auf.

Abbildung 48 zeigt die geschätzten kumulierten Treibhausgasemissionen von Verbrennerfahrzeugen (ICEV), die gasförmige fossile und biogene Kraftstoffe nutzen. CNG hat die höchsten Treibhausgasemissionen und CRG aus einem Biomassemix die niedrigsten. Die Beimischung von 5 % CRG zu CNG trägt im Vergleich zu CNG wenig zur Einsparung von Treibhausgasen bei.

Abbildung 49 zeigt die geschätzten kumulierten Treibhausgasemissionen von Wasserstoffbrennstoffzellen-Fahrzeugen (HFCV) und Batterie-Elektrofahrzeugen (BEV), die erneuerbaren Strom aus Wind, Wasser und PV, in den EU-28. Die Treibhausgasemissionen aus

der Produktion des BEV sind höher als die des FCHV, da die Emissionen bei der Batterie höher sind als bei der Brennstoffzelle. Durch das Materialrecycling von Batterien könnte jedoch in der Lebensendphase des BEV eine Treibhausgaseinsparung erreicht werden. Das Wasserstofffahrzeug, das Strom aus der PV nutzt, weist aufgrund der geringeren Energieeffizienz während der Betriebsphase des HFCV im Vergleich zum BEV die höchsten kumulierten Treibhausgasemissionen auf. Bei der Nutzung von Strom aus Wasserkraft und Wind für FCHV und BEV sind die kumulierten Treibhausgasemissionen etwa gleich. Für alle Systeme sind die kumulierten Treibhausgasemissionen aus der Produktionsphase der Fahrzeuge etwa gleich oder höher als die der Betriebsphase.

Abbildung 50 zeigt die geschätzten kumulierten Treibhausgasemissionen von Verbrennerfahrzeugen (ICEV), die flüssige biogene Kraftstoffe und E-Fuels nutzen. Aufgrund des geringeren Energiegehalts und Umwandlungswirkungsgrades von FT-Diesel aus Holz und Stroh ist die Treibhausgasemission des ICEV mit FT-Diesel höher als bei FT-Diesel als E-Kraftstoff aus Windstrom. Für alle Systeme sind die kumulierten Treibhausgasemissionen aus der Produktionsphase der Fahrzeuge etwa gleich oder höher als die aus der Betriebsphase.

Abbildung 51 zeigt die geschätzten kumulierten Treibhausgasemissionen von Verbrennerfahrzeugen (ICEV), die gasförmige biogene Kraftstoffe und E-Fuels nutzen. ICEV, die CRG aus einem Biomassemix nutzen, haben die höchsten kumulierten Treibhausgasemissionen, ICEV mit CRG als E-Kraftstoff aus Wind die niedrigsten. Im Falle von CRG als E-Kraftstoff sind die Treibhausgasemissionen aus der Produktionsphase des Fahrzeugs höher als die aus der Betriebsphase.

Abbildung 52 zeigt die geschätzten kumulierten Treibhausgasemissionen von Batterie-Elektrofahrzeugen (BEV) und Wasserstoffbrennstoffzellen-Fahrzeugen (HFCV) sowie von ICE-Fahrzeugen mit FT-Diesel aus Biomasse und als E-Fuel für 2019. Alle Systeme haben etwa die gleichen kumulierten Treibhausgasemissionen – mit Ausnahme von E-Kraftstoff, der CO₂ aus der Luft verwendet. Allerdings sind die Beiträge aus Produktions-, Betriebs- und Lebensendphase sehr unterschiedlich.

In Abbildung 53 sind die geschätzten kumulierten Treibhausgasemissionen ausgewählter Verkehrssysteme dargestellt. Die kumulierten Treibhausgasemissionen sind ganz unterschiedlich: Systeme mit einem hohen Anteil an fossilen Energien (z. B. Benzin, Diesel und E-Kraftstoff aus dem aktuellen EU-28-Strommix) haben hohe Treibhausgasemissionen, Systeme mit einem hohen Anteil an erneuerbarer Energie haben niedrige Treibhausgasemissionen (z. B. BEV, E-Fuels und

HFCV mit erneuerbarem Strom), auch wenn die Treibhausgasemissionen aus der Produktionsphase dieser Systeme innerhalb des gesamten Lebenszyklus besonders relevant sein könnten.

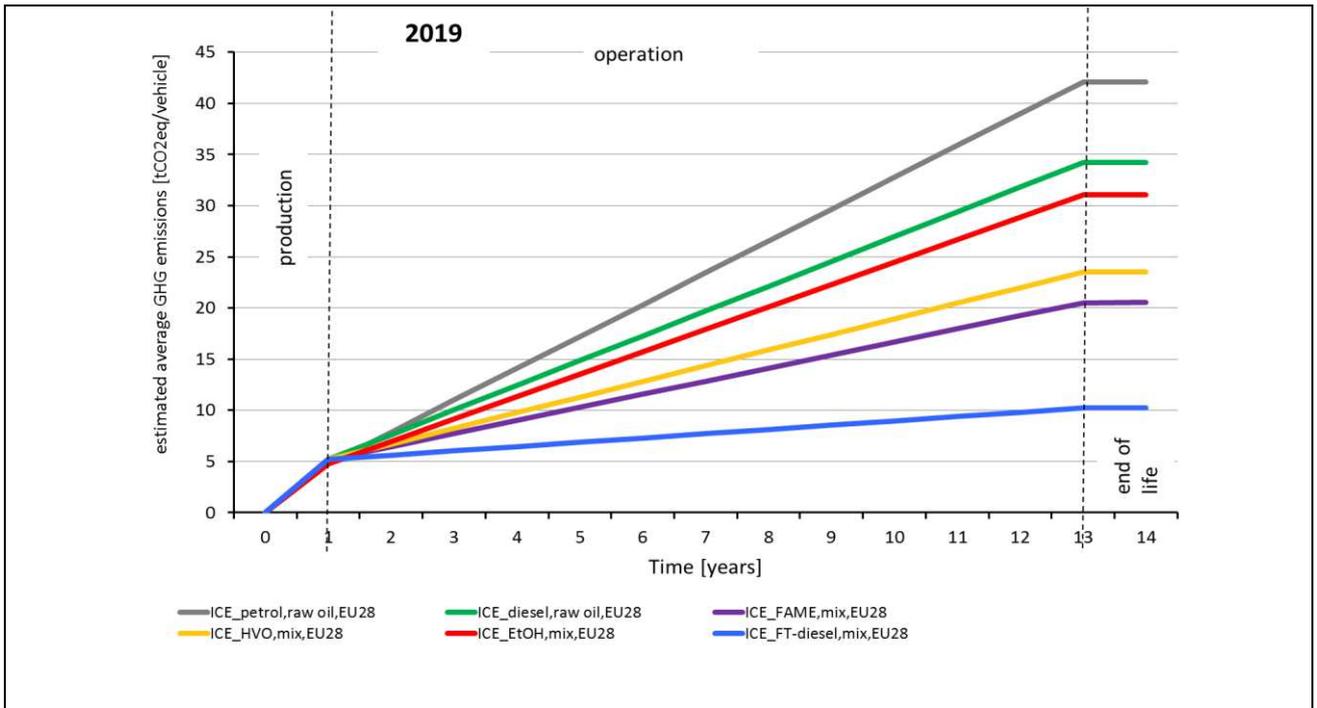


Abbildung 47: Geschätzte kumulierte Treibhausgasemissionen von Verbrennerfahrzeugen (ICEV), die flüssige fossile und biogene Kraftstoffe nutzen

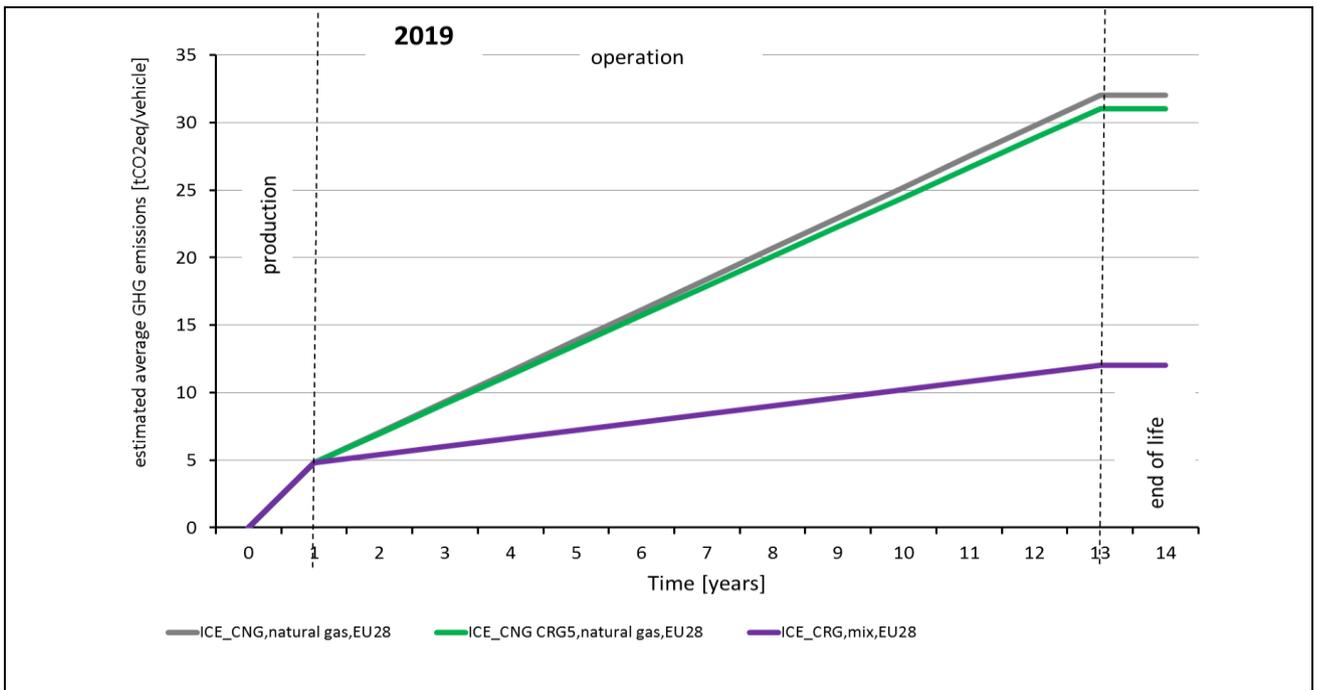


Abbildung 48: Geschätzte kumulierte Treibhausgasemissionen von Verbrennerfahrzeugen (ICEV), die gasförmige fossile und biogene Kraftstoffe nutzen

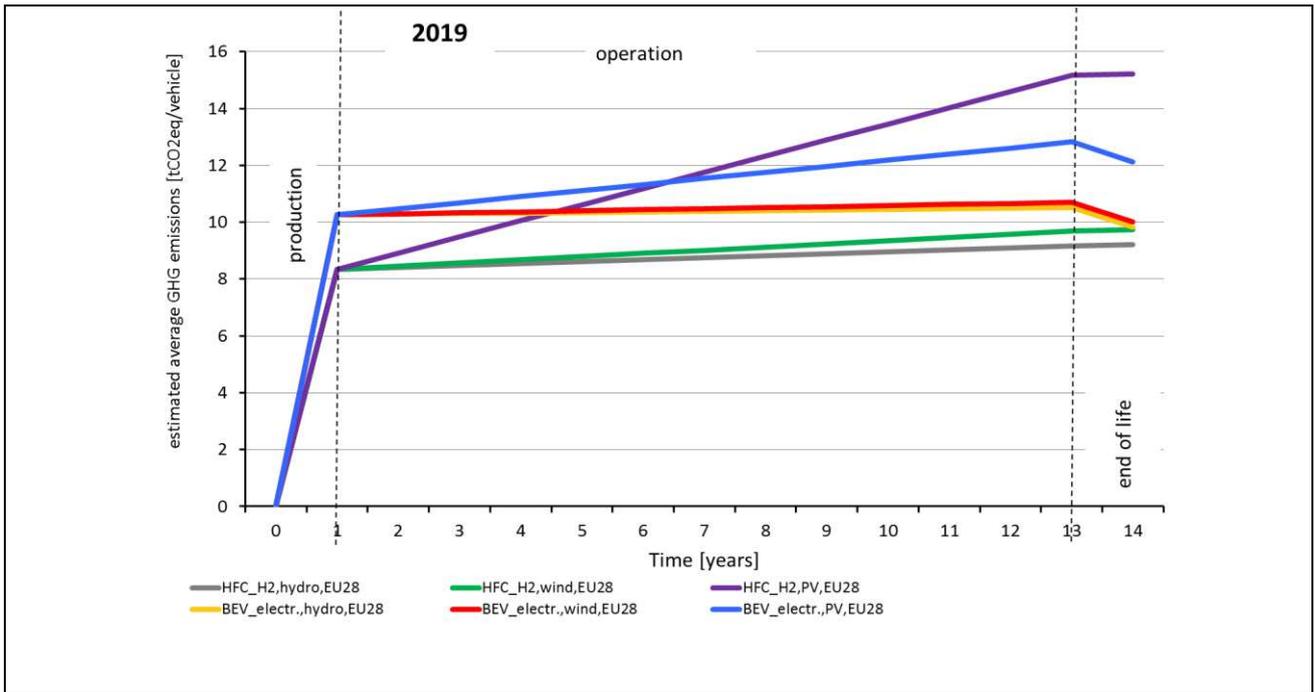


Abbildung 49: Geschätzte kumulierte Treibhausgasemissionen von Wasserstoffbrennstoffzellen-Fahrzeugen (HFCV) und Batterie-Elektrofahrzeugen (BEV), die erneuerbaren Strom aus Wind, Wasser und PV nutzen, in den EU-28

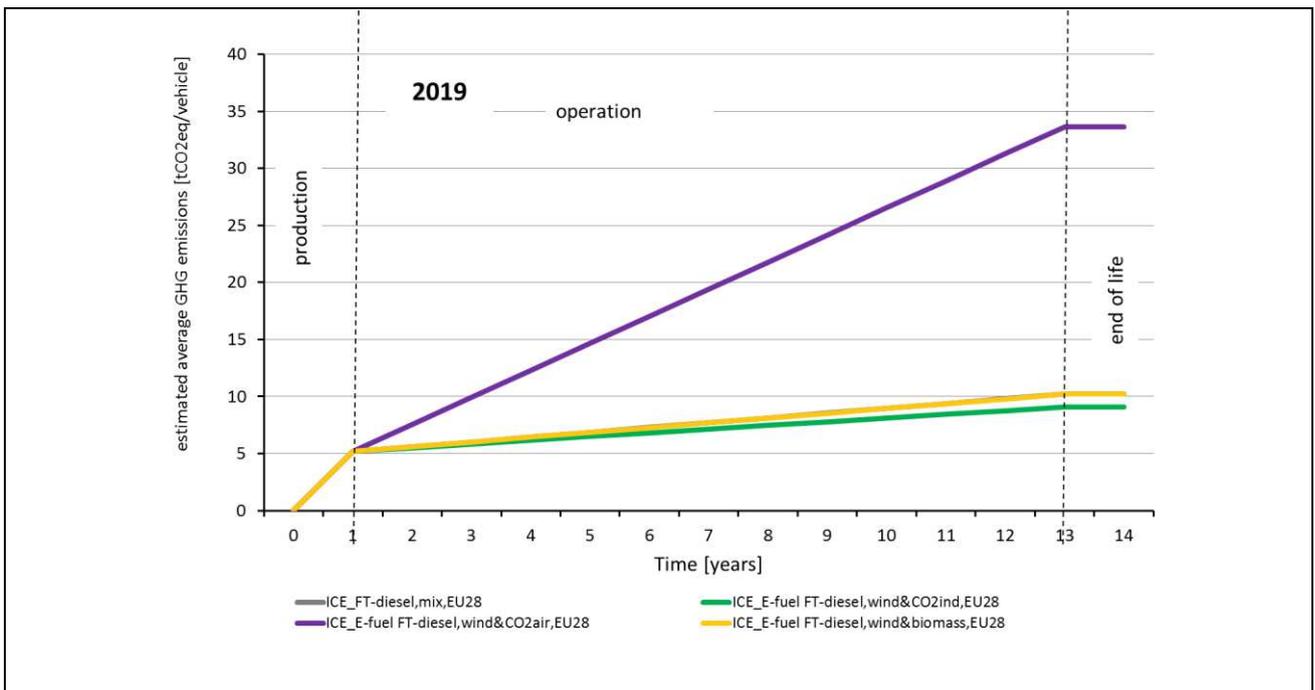


Abbildung 50: Geschätzte kumulierte Treibhausgasemissionen von Verbrennerfahrzeugen (ICEV), die flüssige biogene Kraftstoffe und E-Fuels nutzen

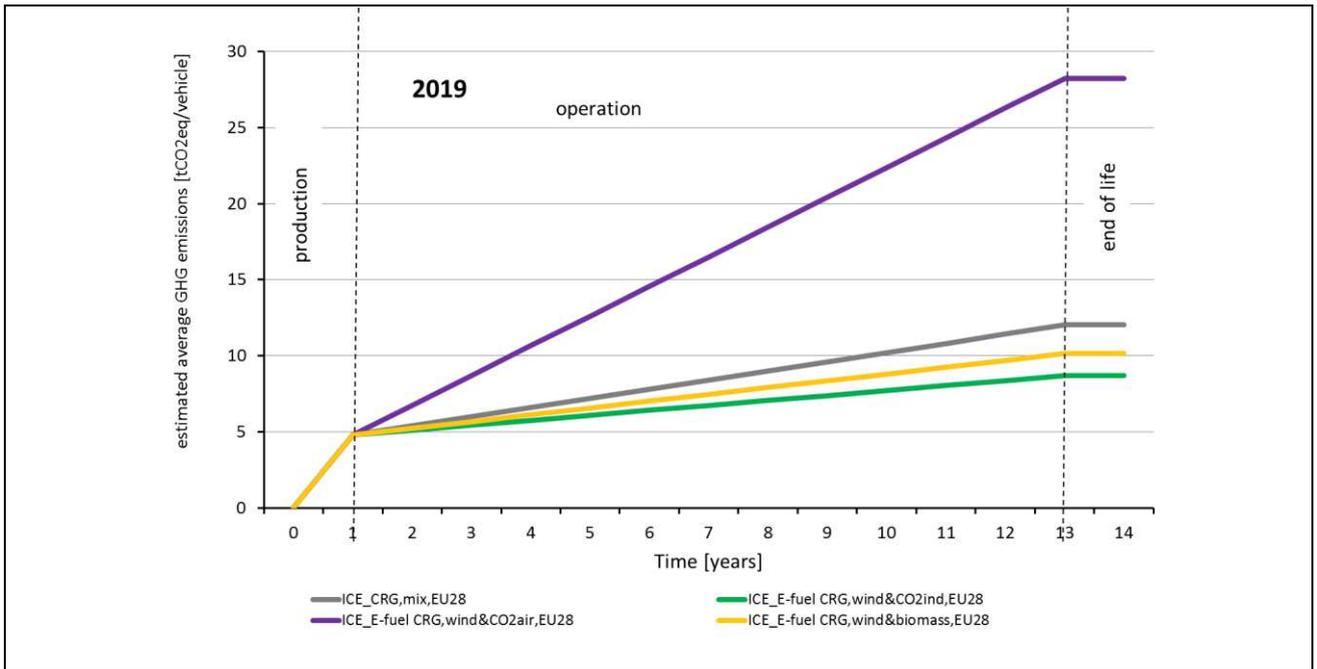


Abbildung 51: Geschätzte kumulierte Treibhausgasemissionen von Verbrennerfahrzeugen (ICEV), die flüssige biogene Kraftstoffe und E-Fuels nutzen

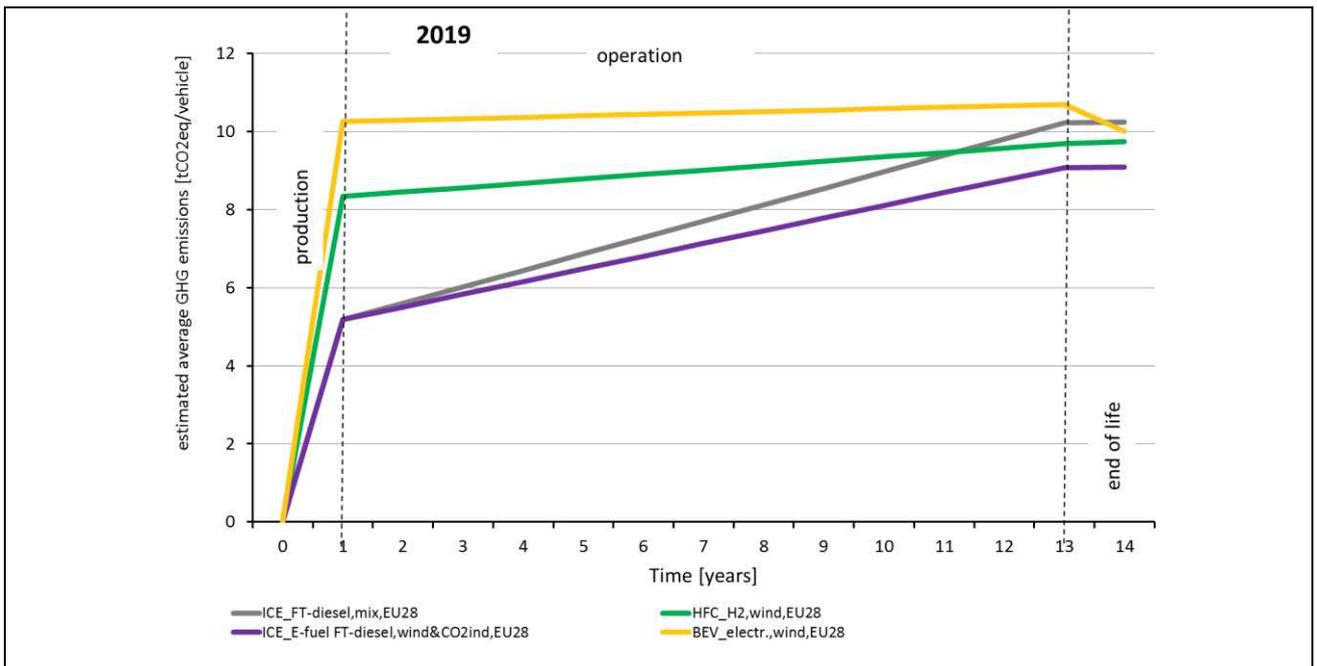


Abbildung 52: Geschätzte kumulierte Treibhausgasemissionen von Batterie-Elektrofahrzeugen (BEV) und Wasserstoffbrennstoffzellen-Fahrzeugen (HFCV) sowie von ICE-Fahrzeugen mit FT-Diesel aus Biomasse und als E-Fuel

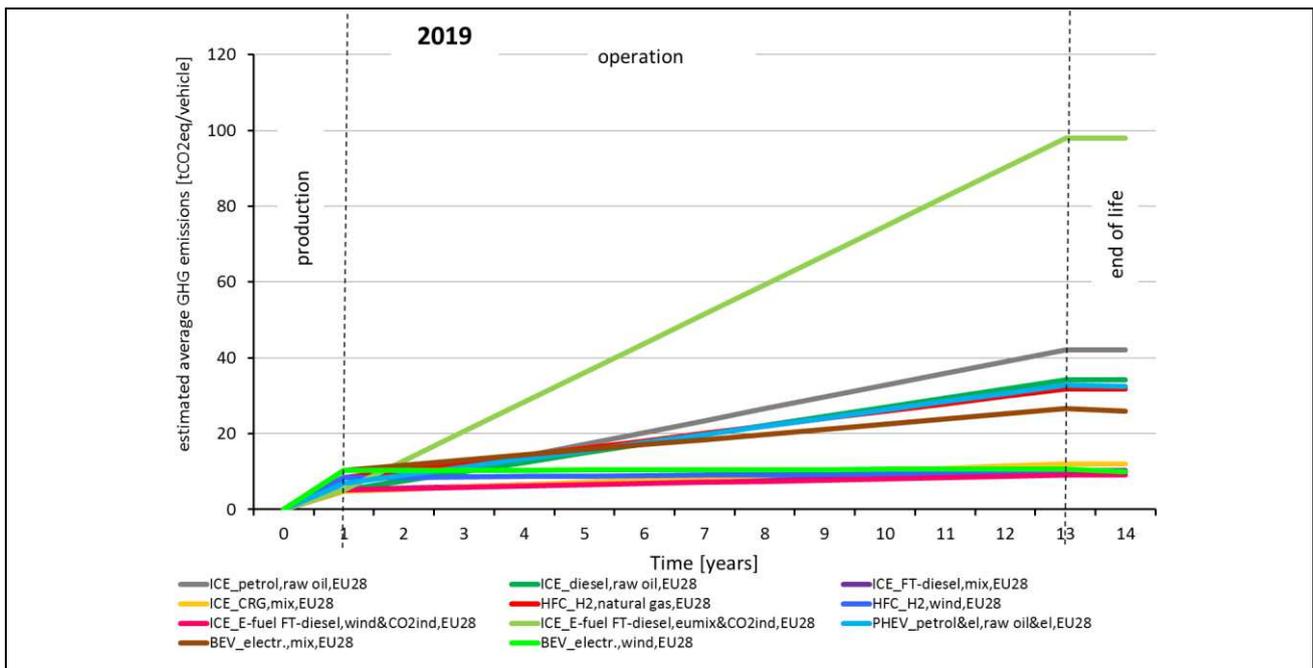


Abbildung 53: Geschätzte kumulierte Treibhausgasemissionen ausgewählter Verkehrssysteme

7. Hauptidekenntnisse und Schlussfolgerungen

Die Hauptidekenntnisse der LCA-basierten Umweltbewertung zur Abschätzung der Treibhausgasemissionen und des kumulierten Primärenergieaufwands sind:

- Eine Bewertung der Umweltauswirkungen ist nur auf Grundlage der Lebenszyklusanalyse möglich.
- Der Anteil der Produktions- und der Betriebsphase an den gesamten kumulierten Umweltauswirkungen kann sich abhängig vom betrachteten System stark unterscheiden.
- Dabei müssen alle drei Arten von Treibhausgasemissionen – CO₂, CH₄ und N₂O – berücksichtigt werden, Besonders relevant sind CO₂ für fossile Kraftstoffe, CH₄ für Erdgas, Kohle und komprimiertes erneuerbares Gas sowie N₂O für Biokraftstoffe aus Nutzpflanzen.
- Die Treibhausgasemissionen und der Primärenergieaufwand müssen getrennt bewertet werden, da niedrige Treibhausgasemissionen aus der Nutzung erneuerbarer Energien nicht mit einer hohen Energieeffizienz verbunden sind, denn: fossile Kraftstoffe sind zwar häufig energieeffizienter, weisen aber auch hohe Treibhausgasemissionen auf.
- Häufig korreliert der fossile Primärenergieaufwand mit den Treibhausgasemissionen, mit Ausnahme von Biokraftstoffen aufgrund der N₂O-Emissionen aus landwirtschaftlicher Biomasse (z. B. HVO aus Raps) und CH₄-Emissionen aus gasförmigen Kraftstoffen wie z. B. CNG und CRG.

- Verkehrssysteme auf Basis von fossilen Kraftstoffen (z. B. Benzin, Diesel und CNG) weisen die höchsten Treibhausgasemissionen auf.
- Verkehrssysteme unter Nutzung (eines hohen Anteils an) erneuerbarer Energie weisen geringe Treibhausgasemissionen auf, wobei in manchen Fällen die Treibhausgasemissionen aus der Produktionsphase besonders dominieren können.
- Selbst auf lange Sicht kann es kein treibhausgasneutrales Fahrzeug geben, aber Treibhausgasemissionen von weniger als 25 g CO₂-Äq./km sind unter Annahme weiterer technologischer Entwicklungen möglich.
- Der ausschlaggebendste Parameter für alle Systeme ist der Energieaufwand zum Betrieb des Fahrzeugs. Leichte und kleine Fahrzeuge, die zudem langsam fahren, können bei allen betrachteten Systemen ebenfalls zu einem niedrigen Energieverbrauch während des Fahrzeugbetriebs beitragen.
- Die Lebensdauer des Fahrzeugs und insbesondere der Wasserstoffbrennstoffzelle bzw. der Batterie kann einen wesentlichen Einfluss auf die Treibhausgasemissionen aus der Produktionsphase pro Kilometer haben.
- Nebenprodukte sind von besonderer Bedeutung bei allen Biokraftstoffen, z. B. Tierfutter aus HVO, FAME und Bioethanol, Wärme aus FT-Diesel und CRG.
- Ein relevantes Nebenprodukt des Stroms für BEV und PHEV ist die Wärme aus Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen, die als Fernwärme genutzt wird/werden kann.
- Eine zunehmende Nutzung erneuerbarer Energien im Straßenverkehr führt zu sinkenden Treibhausgasemissionen. Da die verfügbare zusätzliche erneuerbare Energie effizient genutzt werden sollte, wird auch ein niedrigerer Primärenergieaufwand bedeutsamer, weil z. B. ein BEV mit derselben Menge an erneuerbarer Energie eine größere Reichweite als ein HFCV oder ein E-Fuel-ICEV erzielen kann.

8. Referenzen

Ajanovic et al. 2018: A. Ajanovic, R. Haas, Electric vehicles: solution or new problem?, Environ Dev Sustain, <https://doi.org/10.1007/s10668-018-0190-3>, 2018

BioGrace 2015: The BioGrace GHG calculation tool: a recognised voluntary scheme by the European Commission in line with the sustainability criteria of the Renewable Energy Directive (2009/28/EC, RED) and the Fuel Quality Directive (2009/30/EC); <https://www.biograce.net/>

Ecoinvent 2019 (Version 3.4): Wernet, G., Bauer, C., Steubing, B., Reinhard, J., Moreno-Ruiz, E., und Weidema, B., 2016. The ecoinvent-Dat database version 3 (part I): overview and methodology.

The International Journal of Life Cycle Assessment, [online] 21(9), pp.1218–1230. Abrufbar unter: <<http://link.springer.com/10.1007/s11367-016-1087-8>> [March 6, 2019]

EUA 2018: Final energy consumption by mode of transport, European Environmental Agency, Indicator Assessment Prod-ID: IND-113-en, Also known as: TERM 001, Created 18 Oct 2017 Published 05 Dec 2017 Last modified 10 Sep 2018; <https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/indicators/transport-final-energy-consumption-by-mode/assessment-8>, aufgerufen am 9.10.2018

ePURE 2018: European renewable ethanol — key figures 2017 (<https://epure.org/media/1763/180905-def-data-epure-statistics-2017-designed-version.pdf> aufgerufen am 09.10.2018), ePURE_180905-def-data-epure-statistics-2017.pdf

EU 2009: RICHTLINIE 2009/28/EG DES EUROPÄISCHEN PARLAMENTS UND DES RATES vom 23. April 2009 zur Förderung der Nutzung von Energie aus erneuerbaren Quellen und zur Änderung und anschließenden Aufhebung der Richtlinien 2001/77/EG und 2003/30/EG, Brüssel, 5. Juni 2009

RICHTLINIE (EU) 2015/1513 DES EUROPÄISCHEN PARLAMENTS UND DES RATES vom 9. September 2015 zur Änderung der Richtlinie 98/70/EG über die Qualität von Otto- und Dieselmotoren und zur Änderung der Richtlinie 2009/28/EG zur Förderung der Nutzung von Energie aus erneuerbaren Quellen, Brüssel, 9. September 2015

EU 2018: The EU Reference Scenario 2016: Energy, transport and GHG emissions – Trends to 2050, <https://ec.europa.eu/energy/en/data-analysis/energy-modelling>

EU 2018a: RICHTLINIE (EU) 2018/2001 DES EUROPÄISCHEN PARLAMENTS UND DES RATES vom 11. Dezember 2018 zur Förderung der Nutzung von Energie aus erneuerbaren Quellen, Brüssel 2018

GEMIS 2019: GEMIS 4.95: GEMIS - Globales Emissions-Modell integrierter Systeme, <http://iinas.org/gemis-de.html>

Hausberger et al. 2018: S. Hausberger, S. Lipp: Energieverbrauch und Emissionen von PKW mit unterschiedlichen Antrieben (Energy Demand and Emissions of Passenger Vehicles with Different Propulsion Systems), Institut für Verbrennungskraftmaschinen und Thermodynamik, TU Graz, Graz 2018

IEA 2019: <http://www.iea.org/statistics>

IPCC 2019: The Intergovernmental Panel on Climate Change, www.ipcc.ch

JOANNEUM RESEARCH 2019: LCA data collection from LCA projects since 1993, implemented in GEMIS software and own LCA calculation tool, Graz 2019

National Energy Report 2018: Canada's Energy Future 2018 – Energy Supply and Demand Projections 2040, 2018; <https://www.nrb-one.gc.ca/nrg/ntgrtd/ftr/2018/pblctn-eng.html>

National Grid 2018: Future Energy Scenario, 2018; <http://fes.nationalgrid.com/fes-document/>

PSI 2014: Switzerland Energy Transition Scenarios – Development and Application of the Swiss TIMES Energy System Model, PSI, Dezember 2014; <https://www.psi.ch/eem/./2014-STEM-PSI-Bericht-14-06.pdf>

UFOP 2018: Versorgungsbericht 2016/2017 - Der europäische und globale Biomassebedarf für die Biokraftstoffproduktion im Kontext der Versorgung an den Nahrungs- und Futtermittelmärkten, UNION ZUR FÖRDERUNG VON OEL- UND PROTEINPFLANZEN E.V. (UFOP) D_UFOP-Biodiesel_2016-2017.pdf

Vali H. et al., 2015: The land use change impact of biofuels consumed in the EU. Ecofys, IIASA, E4tech, 2015

9. Anhang I: Hintergrunddaten

9.1 LCA der Batterieproduktion

In diesem Kapitel wird das LCA-Modell der Batterieproduktion beschrieben.

9.1.1 Basisdaten

Für die LCA-basierte Schätzung der Treibhausgasemissionen und des kumulierten Primärenergieaufwands von Fahrzeugbatteriesystemen wurden in erster Linie folgende Literaturquellen herangezogen:

- Ahmed A. et al. (2016). Energy impact of cathode drying and solvent recovery during lithium-ion battery manufacturing. *Journal of Power Sources*, Volume 322, S. 169-178
- Dai Q. et al. (2017). Update of Life Cycle Analysis of Lithium-ion Batteries in the GREET Model. Argonne National Laboratory. Lemont, USA.
- Ellingsen. L. A-W. et al. (2017). Identifying key assumptions and differences in life cycle assessment studies of lithium-ion traction batteries. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*.
- Ellingsen L.A. et al. (2016). The size and range effect: lifecycle greenhouse gas emissions of electric vehicles. *Environ. Res. Lett.* 11. Norwegian University of Science and Technology (NTNU). Trondheim, Norwegen.
- Ellingsen. L. A-W. et al. (2014). Life Cycle Assessment of a Lithium-Ion Battery Vehicle Pack. *Journal of Industrial Ecology* 18(1). Norwegian University of Science and Technology (NTNU). Trondheim, Norwegen.
- Hall D. et al. (2018). Effects of battery manufacturing on electric vehicle life-cycle greenhouse gas emissions. Briefing. ICCT International Council on Clean Transportation. Berlin, Deutschland.
- Hao H. (2017). Impact of recycling on energy consumption and greenhouse gas emissions from electric vehicle production: The China 2025 case. *Resources, Conservation and Recycling* 122, 114-125. Tsinghua University. Peking, China.
- Le Petit Y. (2017). Electric vehicle life cycle analysis and raw material availability. Briefing. *Transport and Environment*. Brüssel, Belgien.
- Nealer R. et al. (2015). *Cleaner Cars from Cradle to Grave*. Report. Union of Concerned Scientists. Cambridge, USA.
- Qiao Q. et al. (2016). Comparative study on life cycle CO₂ emissions from the production of electric and conventional vehicles in China. *Energy Procedia* 105, 3584-3595. Tsinghua University. Peking, China.

- Romare M. et al. (2017). The Life Cycle Energy Consumption and Greenhouse Gas Emissions from Lithium-Ion Batteries. Report. IVL Swedish Environmental Research Institute. Stockholm, Schweden.

9.1.2 LCA-Modell für Fahrzeugbatterien

Basierend auf der Literatur wurden die Systemgrenzen für das LCA-Modell für Fahrzeugbatterien vom Rohstoff über die Primärenergie bis zum Einsatz der Batterie entwickelt, die in Abbildung 54 dargestellt sind. Die Hauptprozesse sind

- Rohstoffgewinnung und -veredelung
- Herstellung von Qualitätsmaterialien
- Fertigung von Batteriesystemen
- Batterienutzung
- Wiederverwendung
- Recycling und 2. Leben (Wiederverwendung)
- Transport

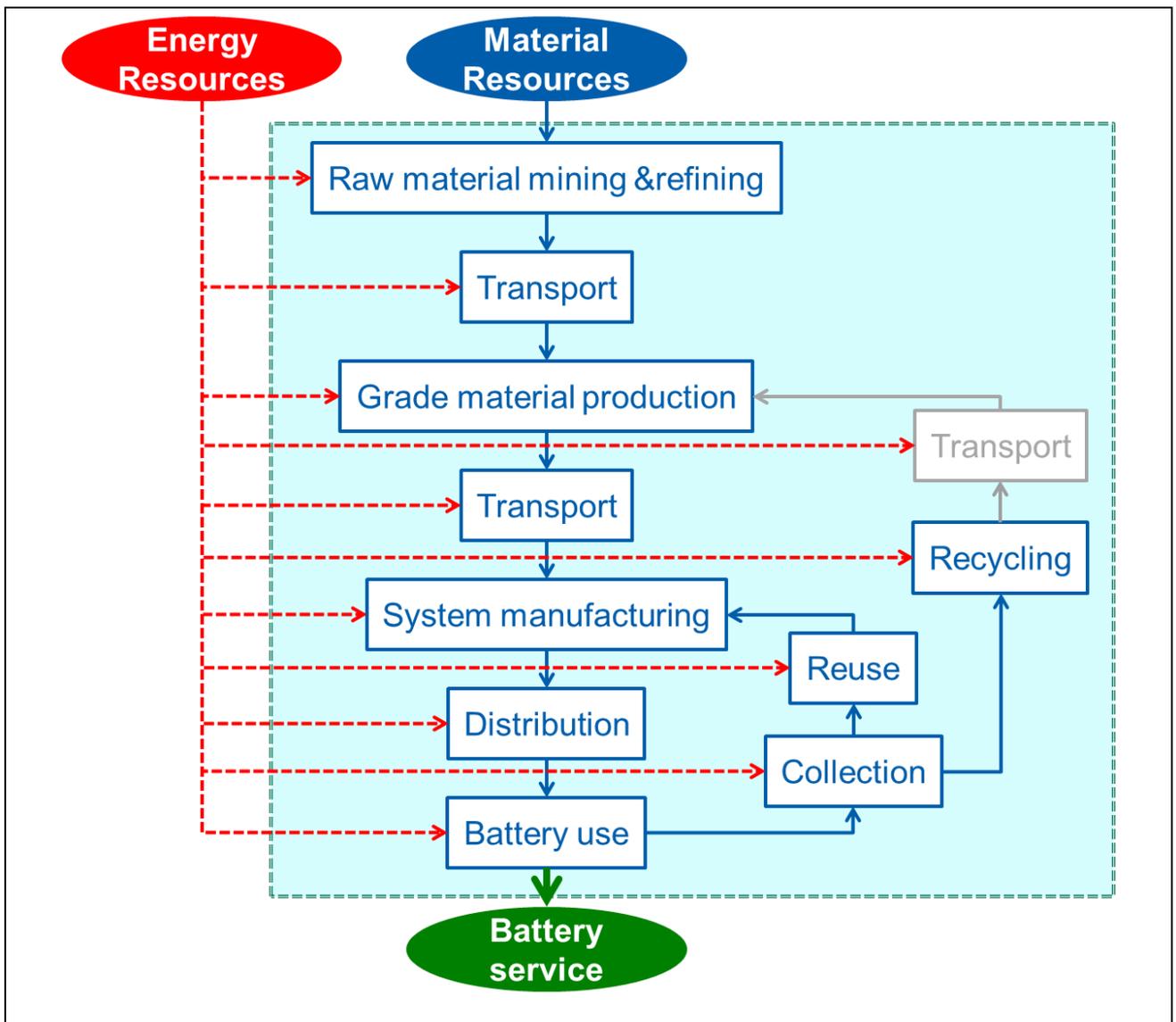


Abbildung 54: Systemgrenzen von Fahrzeugbatterien

Die LCA für Fahrzeugbatteriesysteme wird für die folgenden zwei funktionellen Einheiten durchgeführt:

- pro kWh_{Batteriekapazität}, z. B. kg CO₂-Äq./kWh
- pro km_{Fahrleistung} (35 kWh, 150.000 km), z. B. g CO₂-Äq./km mit einem Pkw

Die Modellierung für das Fahrzeugbatteriesystem wird für die folgenden sieben Hauptkomponenten durchgeführt (Abbildung 55):

1. Kathode
2. Anode
3. Elektrolyt
4. Separator
5. Modul- und Batterie-Packaging
6. Batterie-Management-System (BMS)
7. Kühlsystem

Die Verteilung des Gesamtgewichts auf diese sieben Komponenten ist in Abbildung 56 dargestellt.

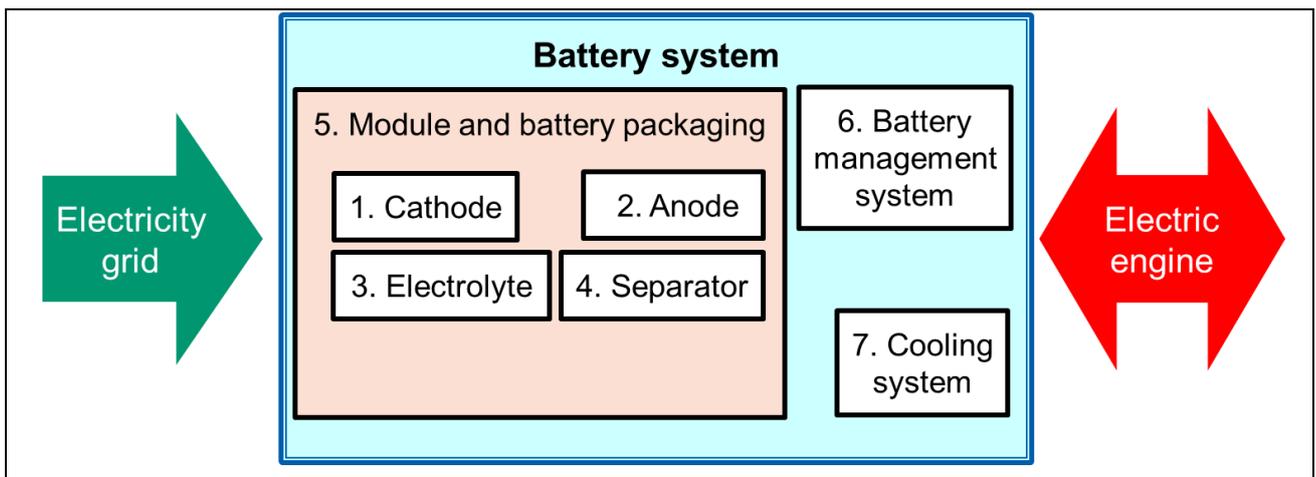


Abbildung 55: Hauptkomponenten des Fahrzeugbatteriesystems

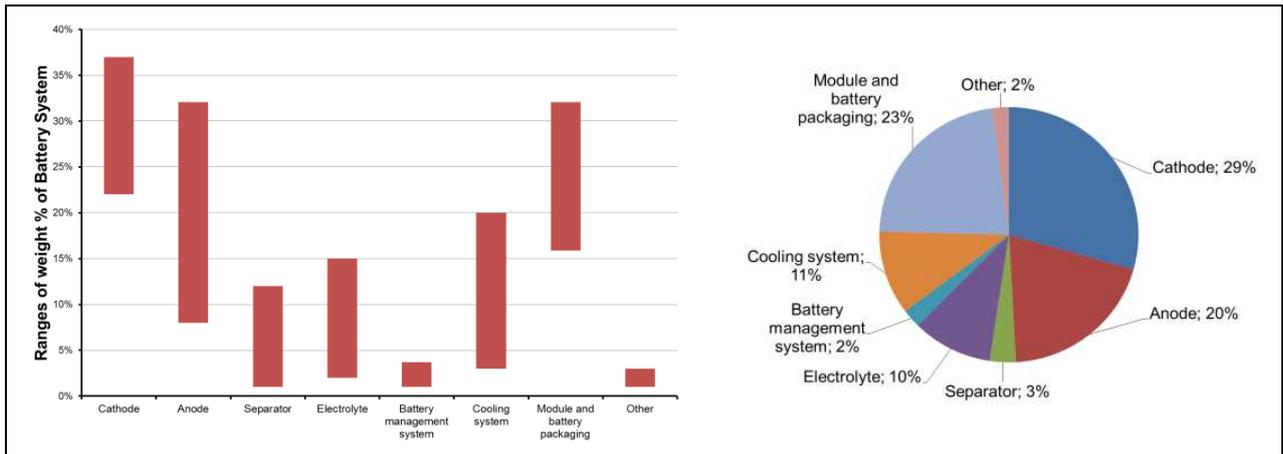


Abbildung 56: Reichweite und geschätzte durchschnittliche Gewichtsverteilung dieser sieben Komponenten im Fahrzeugbatteriesystem (JOANNEUM RESEARCH 2019)

Die LCA betrachtet die folgenden Materialien des Fahrzeugbatteriesystems:

- Aluminium
- Kobalt
- Kupfer
- Graphit
- Lithium
- Mangan
- Nickel
- Kunststoff
- Stahl & Eisen
- Sonstiges

Die Verteilung dieser Materialien in den sieben Komponenten des Fahrzeugbatteriesystems ist in **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** dargestellt.

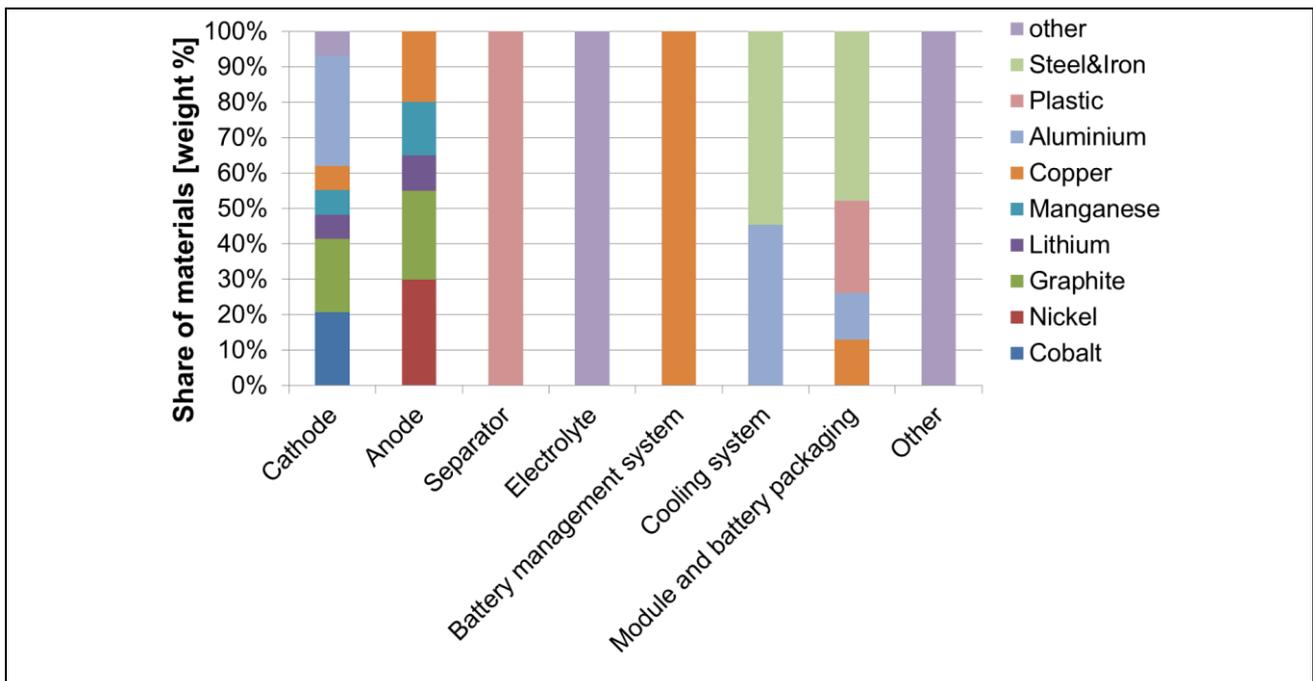


Abbildung 57: Materialverteilung in den sieben Komponenten des Fahrzeugbatteriesystems (JOANNEUM RESEARCH 2019)

9.1.3 Schätzung der Treibhausgasemissionen und des Primärenergieaufwands

Basierend auf der Massenbilanz und den Umweltauswirkungen der Material- und Energieversorgung werden die Treibhausgasemissionen für die Herstellung von hochwertigen Materialien auf der Grundlage von Literaturdaten geschätzt. *Abbildung 58* zeigt den Bereich der geschätzten Treibhausgasemissionen aus der Produktion des hochwertigen Materials von Fahrzeugbatteriesystemen, der zwischen 25 und 68 kg CO₂-Äq./kWh liegt, bei einem geschätzten Durchschnitt von 46 kg CO₂-Äq. pro kWh Batteriekapazität.

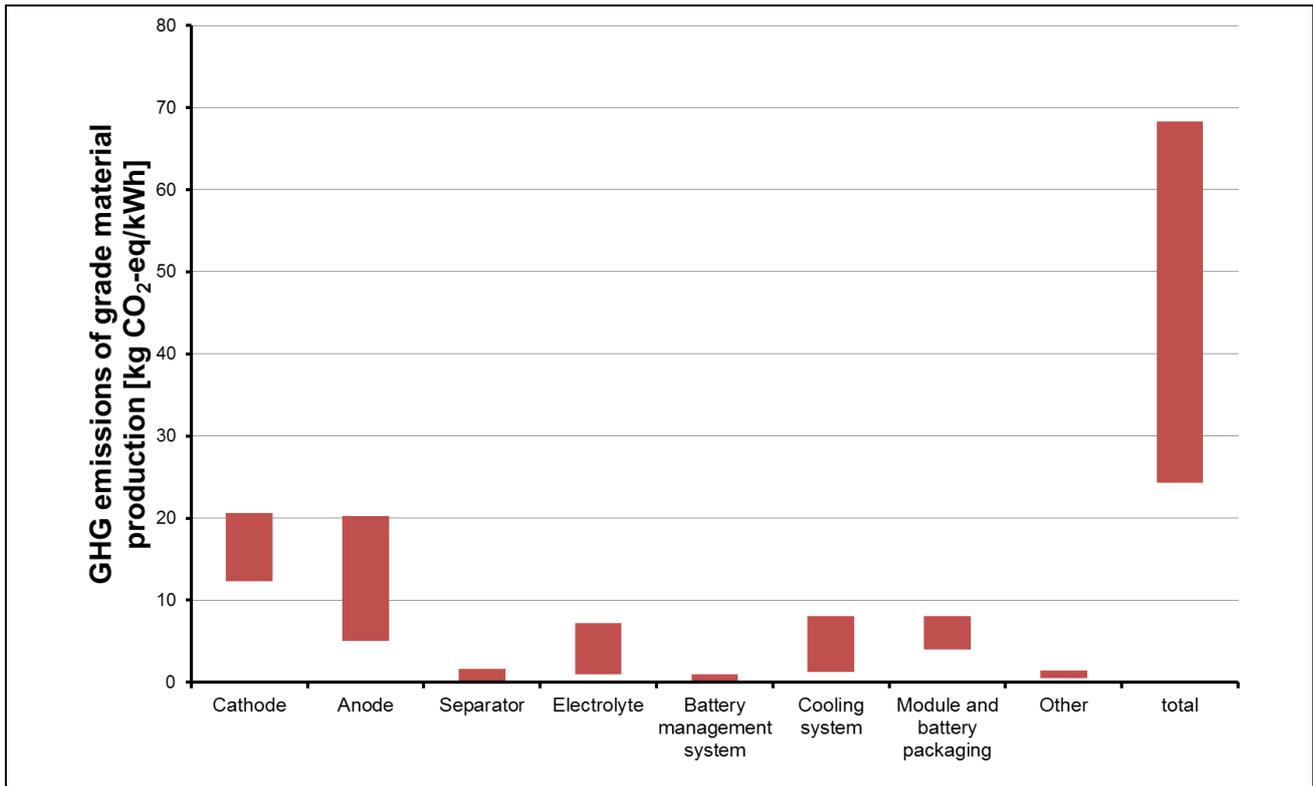


Abbildung 58: Bereich der geschätzten Treibhausgasemissionen aus der Produktion von hochwertigen Materialien für Fahrzeugbatteriesysteme (JOANNEUM RESEARCH 2019)

Der Strombedarf für die Fertigung ist durchaus relevant und wird auf ca. 163 kWh/kWh (Romare 2017, Ellingsen 2014) geschätzt, was als Standardwert verwendet wird. Der Standort der Batterieproduktion bestimmt den Strommix mit seinen Treibhausgasemissionen und dem Primärenergieaufwand. Als Standardwert wurde angenommen, dass die Batterie in Asien mit Treibhausgasemissionen bei der Stromerzeugung von ca. 700 g CO₂-Äq./kWh produziert wird (berechnet aus IEA-Statistiken). ARGONNE hat kürzlich (Dai 2017) neue Daten zum Energiebedarf für die Batterieproduktion veröffentlicht, die in der Sensitivitätsanalyse verwendet werden (siehe Kapitel 9.1.5 Wesentliche Einflüsse).

Für die Lebensendphase von Fahrzeugbatterien – Materialrecycling oder Wiederverwendung in einer stationären Anwendung als 2. Leben – liegen weniger Daten vor. Das Batterierecycling wird derzeit in Pilot- und Demonstrationsanlagen als Kombination aus mechanischen, pyro- und hydrometallurgischen Prozessen getestet. Die LCA-Modellierung geht von folgenden Annahmen aus:

- Demontage des Batteriemoduls und Weiterverwendung von Aluminium und Kunststoffen

- Demontage der Batteriezellen und Weiterverwendung von Kupfer und Aluminium
- Demontage der Kathode und Weiterverwendung von Aluminium und
- Hydrometallurgisches Recycling von Kobalt und Nickel.

Als Recyclingquote der Materialien werden 65 % angenommen, und für diese Sekundärmaterialien werden Gutschriften aus der Primärmaterialproduktion vergeben. Der Energiebedarf für das Recycling wurde geschätzt (nach Romare 2017). Bei der Verwendung der Batterie für ein zweites stationäres Leben wurde davon ausgegangen, dass etwa 50 % der Fahrzeugbatterie in einem zweiten Leben verwendet werden, wobei die besten Zellen getestet und wieder zusammengesetzt werden.

In Abbildung 59 sind die durchschnittlichen geschätzten Treibhausgasemissionen von Fahrzeugbatteriesystemen nach der oben beschriebenen Modellannahme dargestellt. Der Energiebedarf für die Produktion hat einen starken Einfluss auf die geschätzten Treibhausgasemissionen von Fahrzeugbatterien, die pro kWh Batteriekapazität insgesamt etwa 171 kg CO₂-Äq. beim Recycling und 95 kg CO₂-Äq. beim stationären 2. Leben betragen. Das Recycling hat nur einen geringen Einfluss, da die damit verbundenen Treibhausgasemissionen in etwa der Größenordnung der Bonuspunkte für die recycelten Materialien entsprechen, während der Einfluss des 2. Lebens recht hoch ist, da diesem etwa die Hälfte der Treibhausgasemissionen zugeordnet wird.

In Abbildung 60 ist der geschätzte durchschnittliche kumulierte Primärenergieaufwand der Fahrzeugbatteriesysteme dargestellt, der pro kWh Batteriekapazität etwa 561 kWh Primärenergie für das Recycling und 311 kWh Primärenergie für das stationäre zweite Leben entspricht.

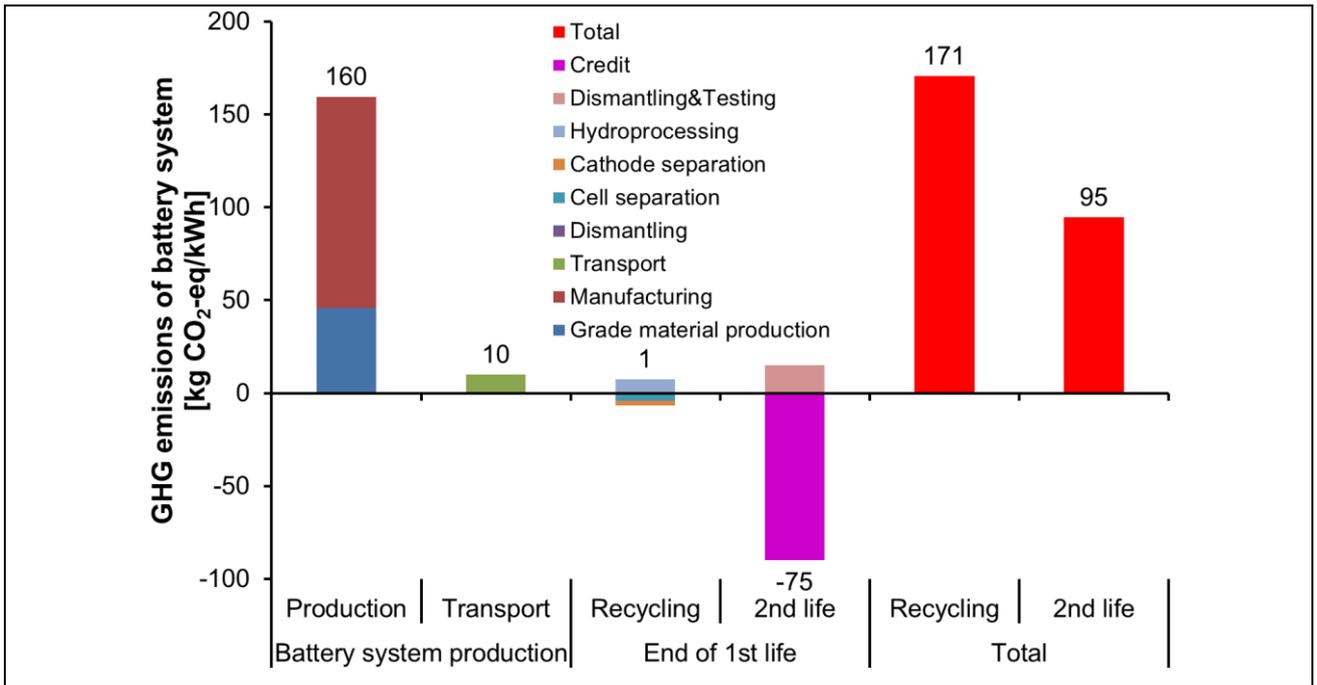


Abbildung 59: Geschätzte durchschnittliche Treibhausgasemissionen der Fahrzeugbatteriesysteme (JOANNEUM RESEARCH 2019)

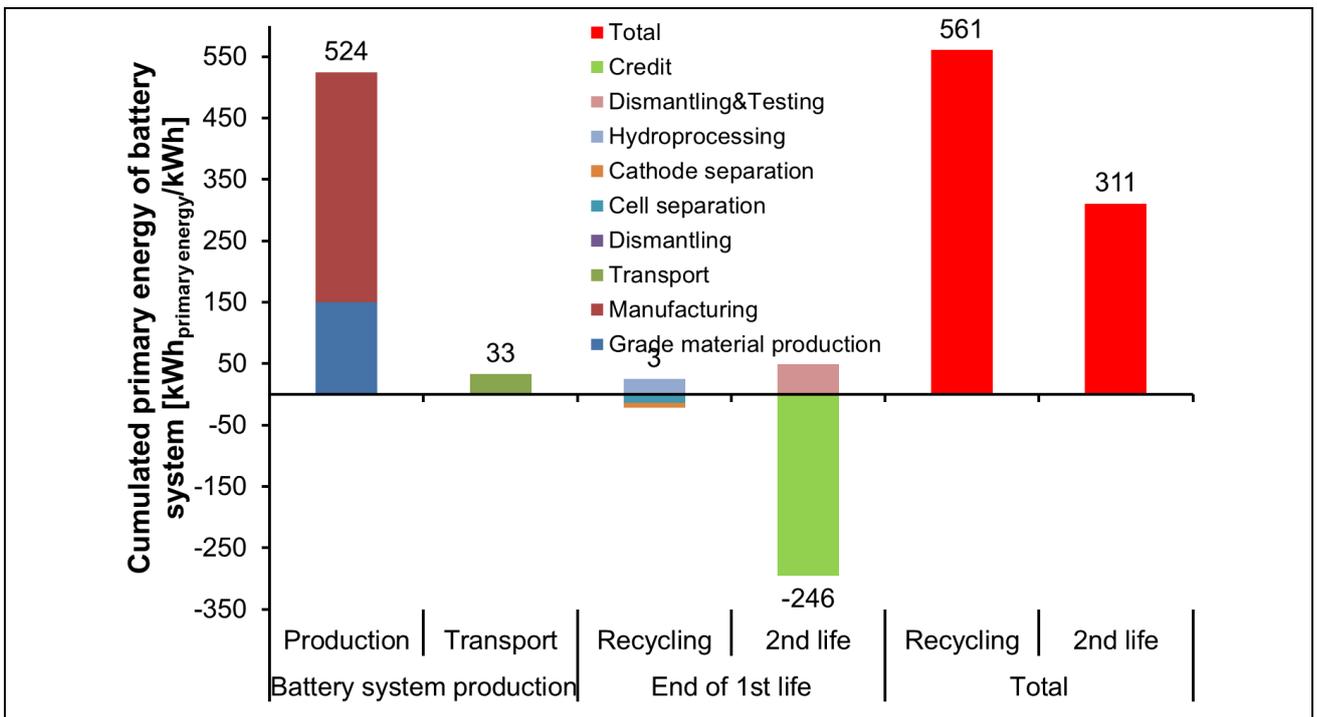


Abbildung 60: Geschätzter durchschnittlicher kumulierter Primärenergieaufwand der Fahrzeugbatteriesysteme (JOANNEUM RESEARCH 2019)

9.1.4 Vergleich mit anderen Studien

Die derzeit relevantesten internationalen Metastudien zu den Treibhausgasemissionen von Fahrzeugbatterien sind die folgenden:

1. *The Life Cycle Energy Consumption and Greenhouse Gas Emissions from Lithium-Ion Batteries*, Studie von ivl Schweden (Romare 2017) und
2. *Effects of Battery manufacturing on Electric Vehicle Life cycle GHG emissions*, Briefing-Dokument von ICCT (ICCT 2018)

Der Vergleich der Treibhausgasemissionen pro Batteriekapazität zeigt:

- ivl: 175 (150 - 200) kg CO₂-Äq./kWh
- ICCT: 175 kg CO₂-Äq./kWh
- JOANNEUM:
 - o Recycling: 171 kg CO₂-Äq./kWh
 - o 2. Leben: 95 kg CO₂-Äq./kWh

und pro gefahrenem Kilometer bei Annahme einer durchschnittlichen Batteriekapazität und Lebensdauer.

- ICCT: 35 g CO₂-Äq./km
- JOANNEUM:
 - o Recycling: 39 g CO₂-Äq./km
 - o 2. Leben: 22 g CO₂-Äq./km

9.1.5 Wesentliche Einflüsse

Ausgehend von der oben genannten Modellierung und ihren Annahmen sind folgende wesentliche Einflüsse und Unsicherheiten bezüglich der Umweltauswirkungen von Fahrzeugbatteriesystemen auszumachen:

- Batteriekapazität pro Fahrzeug (kWh pro Fahrzeug) (Abbildung 61)

- Batterielebensdauer (km) (Abbildung 62)
- Strommix für Batterieproduktion (g CO₂-Äq./kWh Strom) (Abbildung 63)
- Energiebedarf für die Batterieproduktion (kWh pro kWh Batteriekapazität) (Abbildung 64)

Für die Batterieproduktion wird ein durchschnittlicher Energiebedarf von 163 kWh Strom pro kWh Batteriekapazität angenommen (nach Romare 2017, Ellingsen 2014). Jüngste Studien schätzten den Energiebedarf für die Batterieproduktion im kommerziellen Großmaßstab deutlich unter 16 kWh/kWh (Dai 2017, Ahmed 2016), was mit zukünftigen Batterieproduktionssystemen im Giga-Maßstab machbar erscheint.

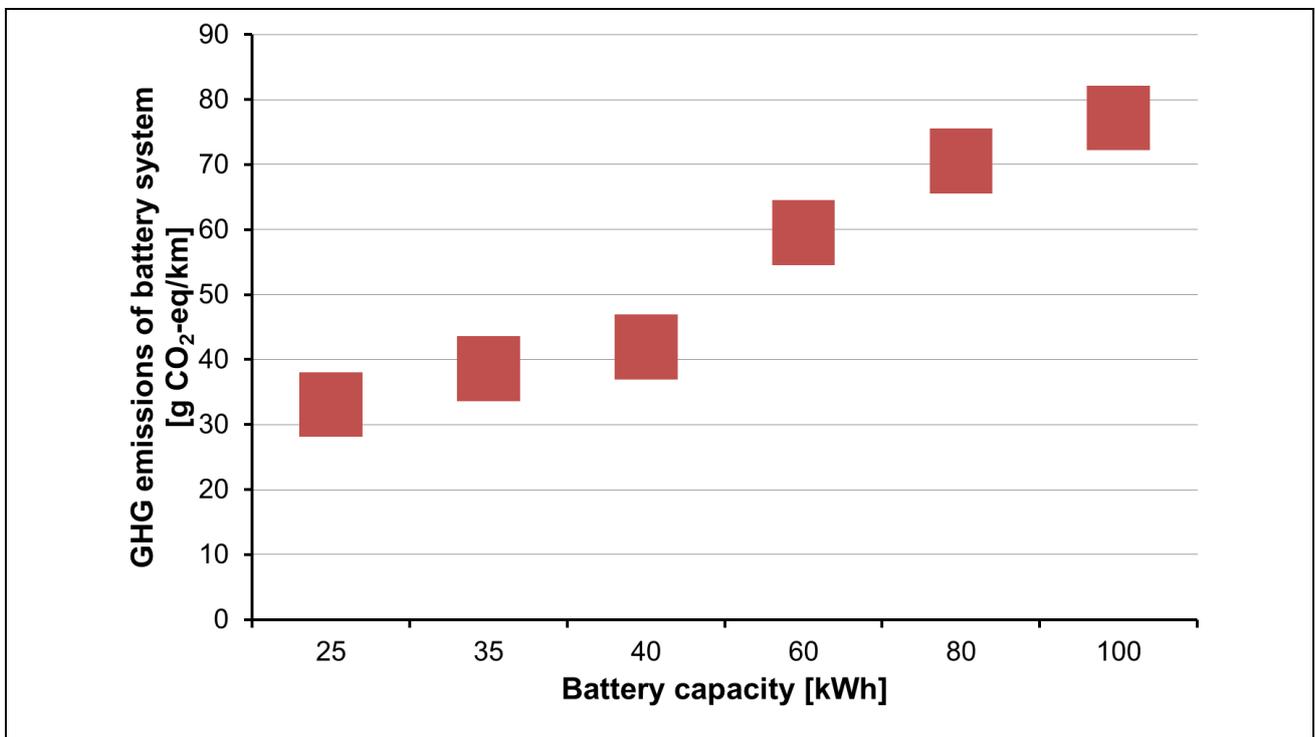


Abbildung 61: Einfluss der Batteriekapazität auf den geschätzten Bereich der Treibhausgasemissionen (JOANNEUM RESEARCH 2019)

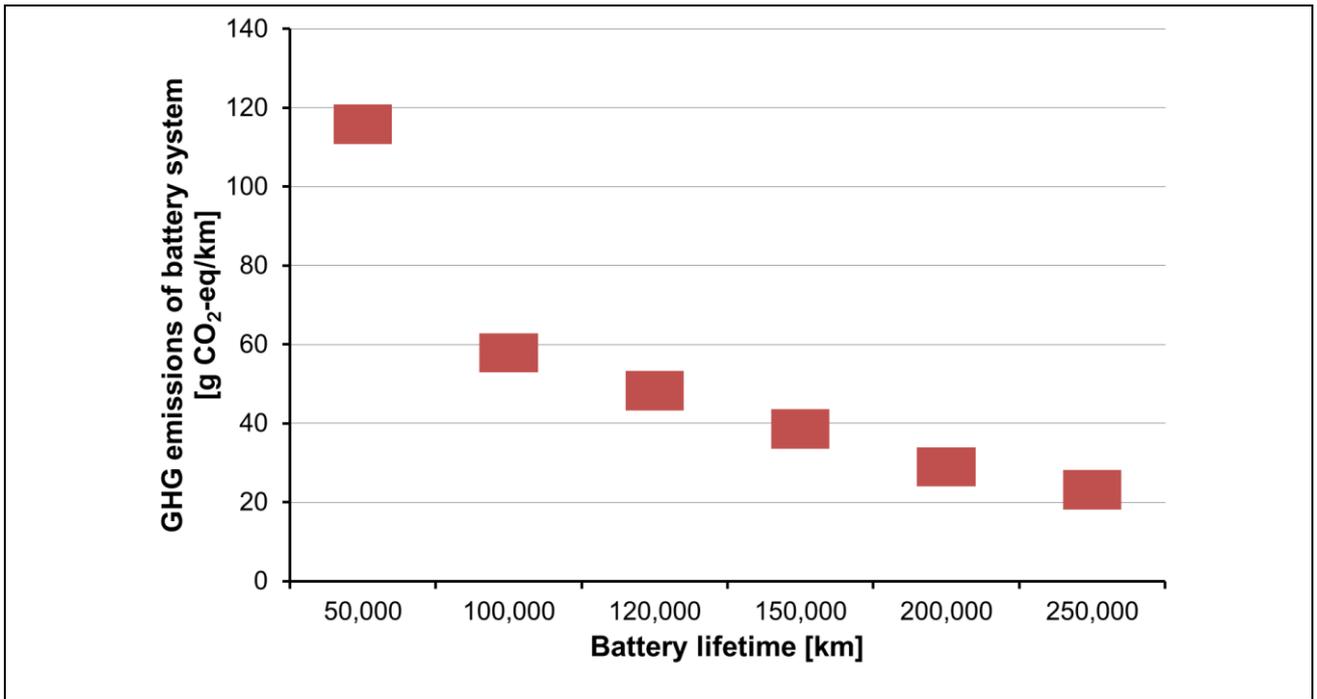


Abbildung 62: Einfluss der Batterielebensdauer auf den geschätzten Bereich der Treibhausgasemissionen (JOANNEUM RESEARCH 2019)

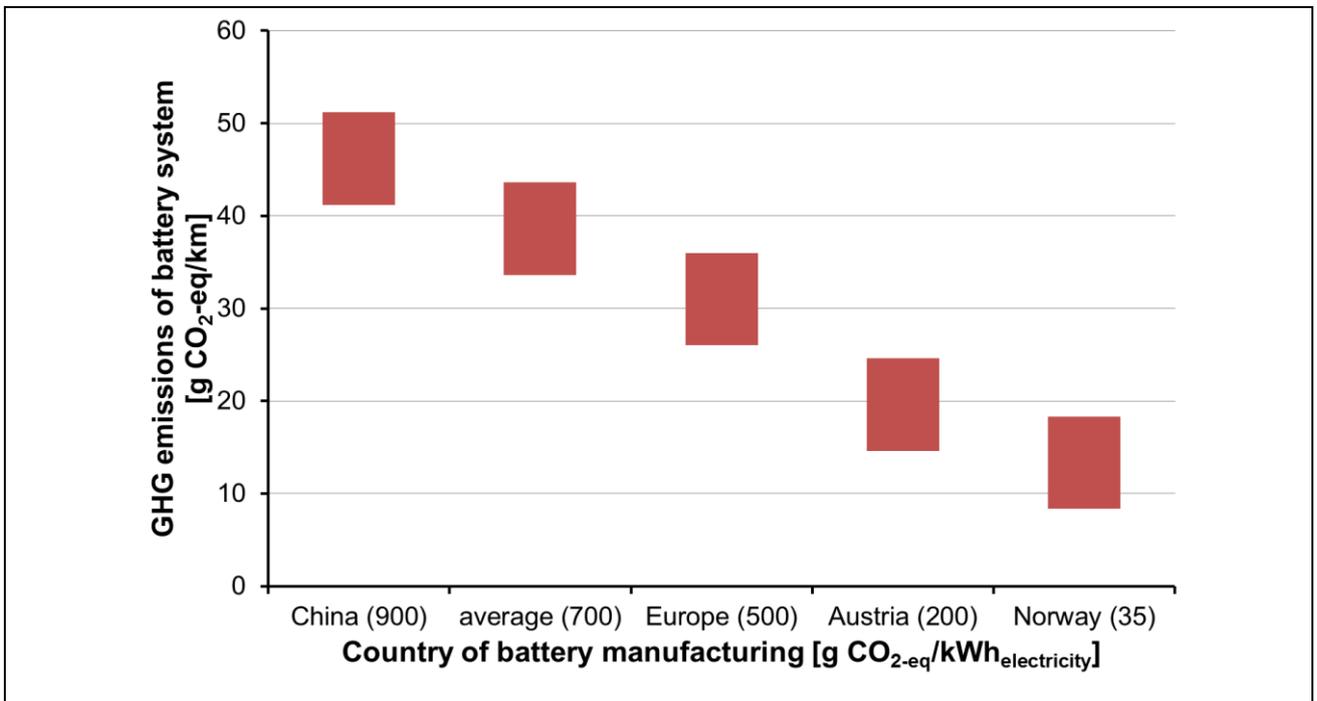


Abbildung 63: Einfluss des länderspezifischen Strommixes für die Batterieproduktion auf den geschätzten Bereich der Treibhausgasemissionen (JOANNEUM RESEARCH 2019)

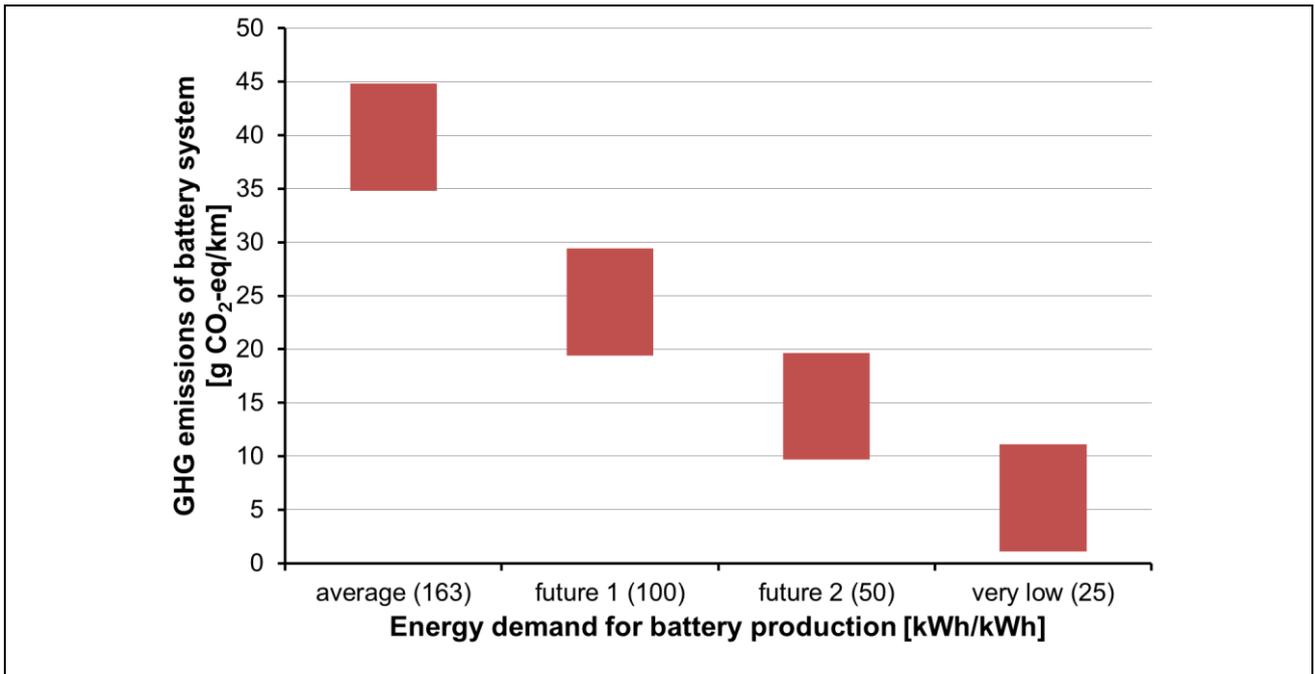


Abbildung 64: Einfluss des Energiebedarfs für die Batterieproduktion auf den geschätzten Bereich der Treibhausgasemissionen (JOANNEUM RESEARCH 2019)

9.2 Wasserstofferzeugung

In Tabelle 39 sind die Hauptdaten für die Wasserstofferzeugung durch Elektrolyse und Erdgasdampfpreformierung dargestellt. Sauerstoff und Wärme aus der Elektrolyse werden nicht genutzt. Der Strombedarf für die Verdichtung und Kühlung von Wasserstoff beträgt 2,7 kWh/kg H₂, basierend auf dem Ionenverdichter IC 90 von Linde Gas.

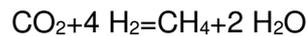
Tabelle 39: Daten für die Wasserstofferzeugung durch Elektrolyse und Erdgasdampfpreformierung (JOANNEUM RESEARCH 2019, BioGrace 2015)

		electrolyses	steam reforming
Output			
H2 30 bar	[MWh]	1	1
Input			
electricity	[MWh]	1.67	
natural gas	[t]		0.086

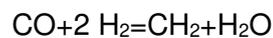
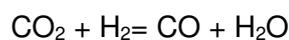
9.3 E-Fuel-Produktion

E-Fuels werden aus einer Kohlenstoffquelle und Wasserstoff hergestellt. Der Wasserstoff wird durch Elektrolyse mit Strom und dem aus Luft, Abgas oder Biomasse gewonnenen Kohlenstoff erzeugt.

Die Formel für die Herstellung von komprimiertem erneuerbarem Gas lautet:



Die beiden Formeln für die Herstellung von FT-Diesel lauten:



In Tabelle 40 sind die Hauptdaten für die CO₂-Abtrennung aus Abgas und Luft dargestellt. In Tabelle 41 sind die Hauptdaten für die FT- und CRG-Produktion aus Biomasse, Wasserstoff and Kohlendioxid angegeben. In der LCA ersetzt die parallel produzierte Wärme Fernwärme aus dem gleichen Rohstoff und der gleichen Ressource wie der E-Kraftstoff.

Tabelle 40: Daten für die CO₂-Abtrennung aus Abgas und Luft (JOANNEUM RESEARCH 2019)

		flue gas	air
Output			
	CO2 [t]	1	1
	water [t]		1
Input			
	electricity [kWh]	80	700
	heat [kWh]		2,200
	MEA (Monoethanolamine) [kg]	0.01	

Tabelle 41: Daten für die FT- und CRG-Produktion aus Biomasse, Wasserstoff and Kohlendioxid (JOANNEUM RESEARCH 2019)

		Mix wood & straw	CO2 & hydrogen	Straw, wood & hydrogen	Mix wood & straw	CO2 & hydrogen	Straw, wood & hydrogen
		FT-diesel			CRG		
Output							
fuel [MWh]		1	1	1	1	1	1
heat as coproduct [kWh/kWh _{pr}]		0.2	0.1	0.1	0.2	0.1	0.1
Input							
raw materials [t]		0.54		0.54	0.45		0.45
	[MWh]	2.00		2.00	1.67		1.67
electricity [kWh]			15	50		15	50
H2 [MWh]		0.06	1.36	1.25		1.23	1.25
CO2 [t]			0.30			0.20	
Nickel [kg]					0.0032	0.008	0.0112
Cobald [kg]		0.001	0.0025	0.0035			

9.4 Biokraftstoff-Produktion

In Tabelle 42 sind die Hauptdaten für die Pflanzenölproduktion angegeben. Das parallel produzierte Tierfutter ersetzt Sojafutter. In Tabelle 43 sind die Hauptdaten für die FAME (Biodiesel)-Produktion dargestellt. Das parallel produzierte Glycerin ersetzt synthetisch hergestelltes Glycerin, und das parallel produzierte Kalium ersetzt synthetischen Dünger.

In Tabelle 44 sind die Hauptdaten für die HVO-Produktion dargestellt. Der parallel produzierte Strom ersetzt den europäischen Netzmix. Die parallel produzierte Wärme ersetzt die Fernwärme aus Hackschnitzeln.

In Tabelle 45 sind die Hauptdaten für die Bioethanolproduktion dargestellt. Das parallel produzierte Tierfutter ersetzt Sojafutter.

In Tabelle 46 sind die Hauptdaten für die Biogasproduktion angegeben, wobei die Wärme aus einer mit Biogas betriebenen KWK-Anlage stammt. Der Strombedarf für die Aufbereitung von Biogas zu CRG (Biomethan) beträgt rund 40 kWh pro MWh CH₄.

Tabelle 42: Daten für die Pflanzenölproduktion (JOANNEUM RESEARCH 2019, BioGrace 2015)

		rape seed	soy bean	palm oil
Output				
	vegetable oil [MWh]	1	1	1
	animal feed [t]	0.13	0.22	
Input				
	raw material [t]	0.25	0.32	0.65
	electricity [kWh]	11.1	33	0*)
	heat [kWh]	50	160	0*)
	fuller's earth [kg]	0.59	0.59	0.002
	phosphoric acid [kg]	0.10	0.11	0.001
	hexane [kg]	0.25	0.11	0
*) provided internally by CHP plant from processing residues				

Tabelle 43: Daten für die FAME (Biodiesel)-Produktion (JOANNEUM RESEARCH 2019, BioGrace 2015)

		amount
Output		
	FAME [MWh]	1
	glycerine [kg]	10
	potassium (as fertilizer) [kg]	0.64
Input		
	vegetable oil [t]	0.10
	electricity [kWh]	8.1
	heat [kWh]	66.1
	methanol [kg]	11.4
	potassium hydroxide [kg]	1.0
	sulfuric acid [kg]	1.0
	phosphoric acid [kg]	0.3
	NaOH [kg]	0.7
	activated carbon [kg]	0.1
	N2 (liquid) [kg]	0.2

Tabelle 44: Daten für die HVO-Produktion (JOANNEUM RESEARCH 2019, BioGrace 2015)

		amount
Output		
HVO	[MWh]	1
electricity	[kWh]	2.1
heat	[kWh]	11.1
Input		
vegetable oil	[t]	0.10
hydrogen	[kWh]	120

Tabelle 45: Daten für die Bioethanol-Produktion (JOANNEUM RESEARCH 2019, BioGrace 2015)

		wheat	maize (corn)	sugar beet	sugar cane	wood	straw
Output							
bioethnaol	[MWh]	1	1	1	1	1	1
animal feed (DDGS)	[kg]	131	121	78			
electricity	[kWh]				0.05	235	214
Input							
raw material	[t]	0.42	0.55	1.62	1.97		0.63
electricity	[kWh]	64	62	47			
heat	[kWh]	450	436	614			
NaOH	[kg]	0.3	0.3	0.3			
ammonia (25%)	[kg]	0.9	0.9	1.1		19	12
sulfuric acid	[kg]	0.3	0.3	0.4		13	5
urea	[kg]	0.1	0.1	0.1			
molasses 880% DM)	[kg]					9	6
Corn Steep Liquor (CSL)	[kg]					25	22
Diammoniahosphate (NH4)2HPO4	[kg]					3	3

Tabelle 46: Daten für die Biogasproduktion (JOANNEUM RESEARCH 2019, BioGrace 2015)

		maize, gras & residues	residues
Output			
biogas (54% CH ₄)	[MWh]	1	
biogas (62% CH ₄)			1
fertilizer as coproduct	[t]	0.83	0.61
Input			
raw material	[t]	0.86	0.63
electricity	[kWh]	29	23.6
heat	[kWh]	313	45
diesel	[kWh]	2.9	2.4

9.5 Energiebedarf und Emissionen von Pkw

9.5.1 Einleitung

Für die Berechnung des Energiebedarfs und der Emissionen von Pkw mit verschiedenen Antrieben und Energieträgern wurde das Simulationsprogramm PHEM (passenger vehicle and heavy duty emission model) des Instituts für Verbrennungskraftmaschinen und Thermodynamik der Technischen Universität Graz verwendet (<https://www.fvt.at/em/phem.html>). Die Simulationen wurden von der Technischen Universität Graz (Hausberger et al. 2018) unter Berücksichtigung des aktuellen Standes der Technik durchgeführt.

Die Simulationen lieferten Ergebnisse zu

- Energieverbrauch beim Fahren, Heizen, Kühlen und durch Nebenaggregate sowie
- CH₄- und N₂O-Emissionen der Fahrzeuge

Die CO₂-Emissionen wurden aus dem Gehalt an fossilem Kohlenstoff in den flüssigen oder gasförmigen Kraftstoffen berechnet.

Im Folgenden werden

- Das Simulationstool PHEM
- Fahrzeugdaten in PHEM
- Der Fahrzyklus und
- Emissionskennfelder in PHEM

beschrieben.

9.5.2 Das Simulationstool PHEM

Das PHEM-Simulationstool wurde von der Technischen Universität Graz (TU Graz) in Zusammenarbeit mit der Forschungsgesellschaft für Verbrennungskraftmaschinen und Thermodynamik (FVT) entwickelt. PHEM ist ein Detailmodell für die 1 Hz-Simulation von Einzelfahrzeugen und Fahrzeugflotten.

Funktionsüberblick:

- Fahrzeuglängsdynamiksimulation unter Verwendung eines „Rückwärts“-Ansatzes

- Motoremissionsverhalten abgebildet durch „Emissionskennfelder“ über Motordrehzahl und Leistung
- Separate Modelle für die Simulation von Abgasnachbehandlung (z. B. SCR, NSC), elektrifizierten Antriebssträngen (HEV, PHEV, EV) und Emissionsverhalten unter transienten Bedingungen
- Zeitauflösung: 1 Hz
- HBEFA-„Durchschnittsfahrzeuge“ sind im entsprechenden PHEM- Datenpaket enthalten
- Zentrale Modellergebnisse: Kraftstoffverbrauch, CO₂- und Schadstoffemissionen
- Schnittstelle zu mikroskaligen Verkehrsmodellen (z. B. VISSIM, Aimsun)

Typische Modellanwendungen:

- Erstellung der Emissionsfaktoren für PKW, leichte und schwere Nutzfahrzeuge für das HBEFA. Implementierung von Zweiradfahrzeugen für das HBEFA läuft.
- Verwendung von HBEFA-„Durchschnittsfahrzeugen“ zur Erzeugung von Emissionsfaktoren für spezielle lokale Bedingungen (benutzerdefinierte Daten zu Fahrzyklen, Straßengradienten, Umgebungsbedingungen, spezieller Flottenmix)
 - o Beispiel: Vergleich der Fahrzeugemissionen bei Tempolimit 30 km/h gegenüber 50 km/h anhand von Geschwindigkeitsmesskurven
- Forschungs- und Entwicklungswerkzeug
 - o Beispiel: Simulation der thermischen Bedingungen in der Abgasanlage für die Auslegung von Abwärmenutzungssystemen
- Verknüpfung mit mikroskaligen Verkehrsmodellen (z. B. VISSIM, Aimsun)
 - o Beispiele: Optimierung von Ampelsteuerungen, hochwertige Luftqualitätsmodellierung
- Akademische Anwendungen (Lehre)

Die Software wird als ausführbarer Code mit einer Lizenzdatei zur Ausführung von PHEM auf zwei Computern geliefert. PHEM verfügt über eine große Datenbank verschiedenster Pkw und schwerer und leichter Nutzfahrzeuge, aus denen auch die Eingabedaten für die „durchschnittlichen“ Fahrzeugkategorien erstellt wurden. Für folgende Kategorien können Dateien geliefert werden:

- Personenkraftwagen (Diesel, Benzin, EURO 0 bis EURO 6d)
- Leichte Nutzfahrzeuge (Diesel, Benzin, EURO 0 bis EURO 6)
- Schwere Nutzfahrzeuge (Diesel, EURO 0 bis EURO VI, Unterteilung in verschiedene Gewichtsklassen)
- Stadtbusse
- Reisebusse

PHEM ist ein Längsdynamikprogramm, das den Bedarf an Antriebsleistung pro Sekunde für einen bestimmten Fahrzyklus (Geschwindigkeit über die Zeit) berechnet. Mit der berechneten Leistung und Motordrehzahl werden die Emissionen anhand von Motoremissionskennfeldern berechnet. Für Elektromotoren in elektrischen Antriebssystemen werden Verlustkennfelder zur Berechnung herangezogen. Die Verluste beim Laden und Entladen von Batterien werden aus dem Innenwiderstand und der vom Ladezustand abhängigen Klemmenspannung berechnet.

Abbildung 65 zeigt eine schematische Darstellung der Simulation in PHEM. Die Eingabedaten ergeben sich aus dem Fahrzyklus, den Daten zu Fahrzeug und Antrieb, den Emissionskennfeldern für Verbrennungsmotoren und den Verlustkennfeldern für Elektromotoren. In Tabelle 47 sind die Eigenschaften der in PHEM-Simulationen verwendeten Kraftstoffe laut EUCAR dargestellt.

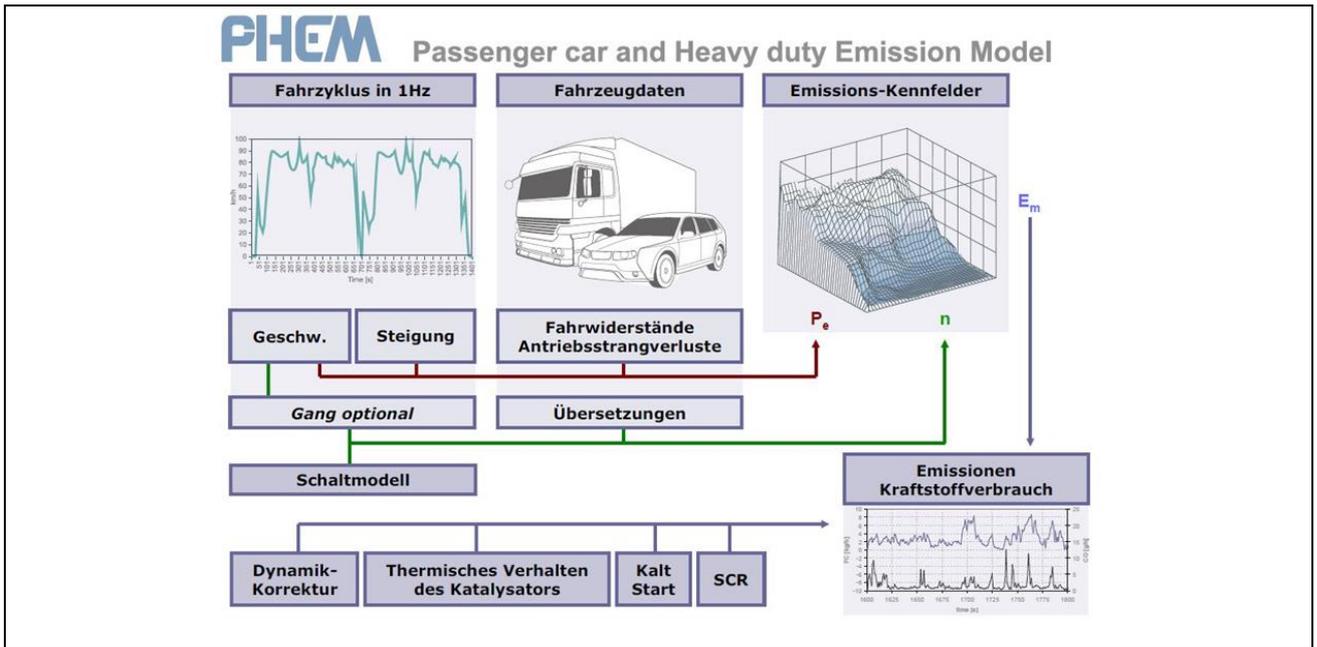


Abbildung 65: PHEM-Simulationsschema (Hausberger et al. 2018)

Tabelle 47: Eigenschaften der in der PHEM-Simulation verwendeten Kraftstoffe (Hausberger et al. 2018)

Kraftstoffart	Dichte	LHV	CO ₂ -Emissionsfaktor	
	[kg/m ³]	[MJ/kg]	[g/MJ]	[kg/kg]
Benzin	743,3	43,2	73,4	3,17
Super E5	745,8	42,3	73,3	3,10
Ethanol	794,0	26,8	71,4	1,91
Diesel	832,0	43,1	73,2	3,16
Diesel B7	836,1	42,7	73,4	3,13
FAME	890,0	37,2	76,2	2,83
HVO	780,0	44,0	70,8	3,12
CNG (EU-Mix, Erdgas aus der Leitung)	0,780	46,6	56,1	2,60
Wasserstoff	0,084	120	0	0

9.5.3 Fahrzeugdaten in PHEM

PHEM benötigt für die Fahrzeugdatei Daten (*Abbildung 66* und *Abbildung 67*) über das Fahrzeug und das Antriebssystem. Zentrale Daten:

- Fahrzeuggewicht und Zuladung [kg]
- Reduzierte Masse der Räder [kg]
- Raddurchmesser [m]
- Fahrwiderstandsbeiwert [-]
- Querschnittsfläche des Fahrzeugs [m²]
- Rollwiderstandsbeiwert [-]
- Nennleistung des Verbrennungsmotors und des Elektromotors [kW]
- Nenndrehzahl des Verbrennungsmotors und des Elektromotors [1/min]
- Leerlaufdrehzahl des Verbrennungsmotors [1/min]
- Trägheit von Motor und Getriebe [kgm²]
- Getriebeübersetzung [-]
- Leistung für Nebenaggregate [kW]

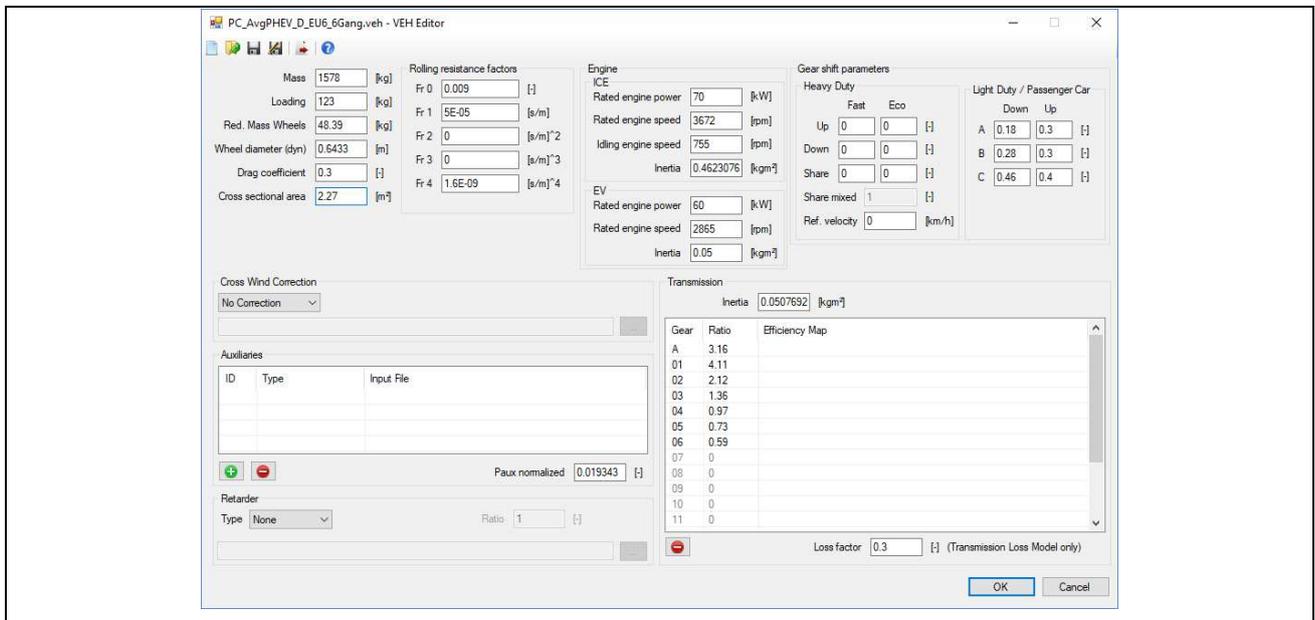


Abbildung 66: Fahrzeugdaten in PHEM (Hausberger et al. 2018)

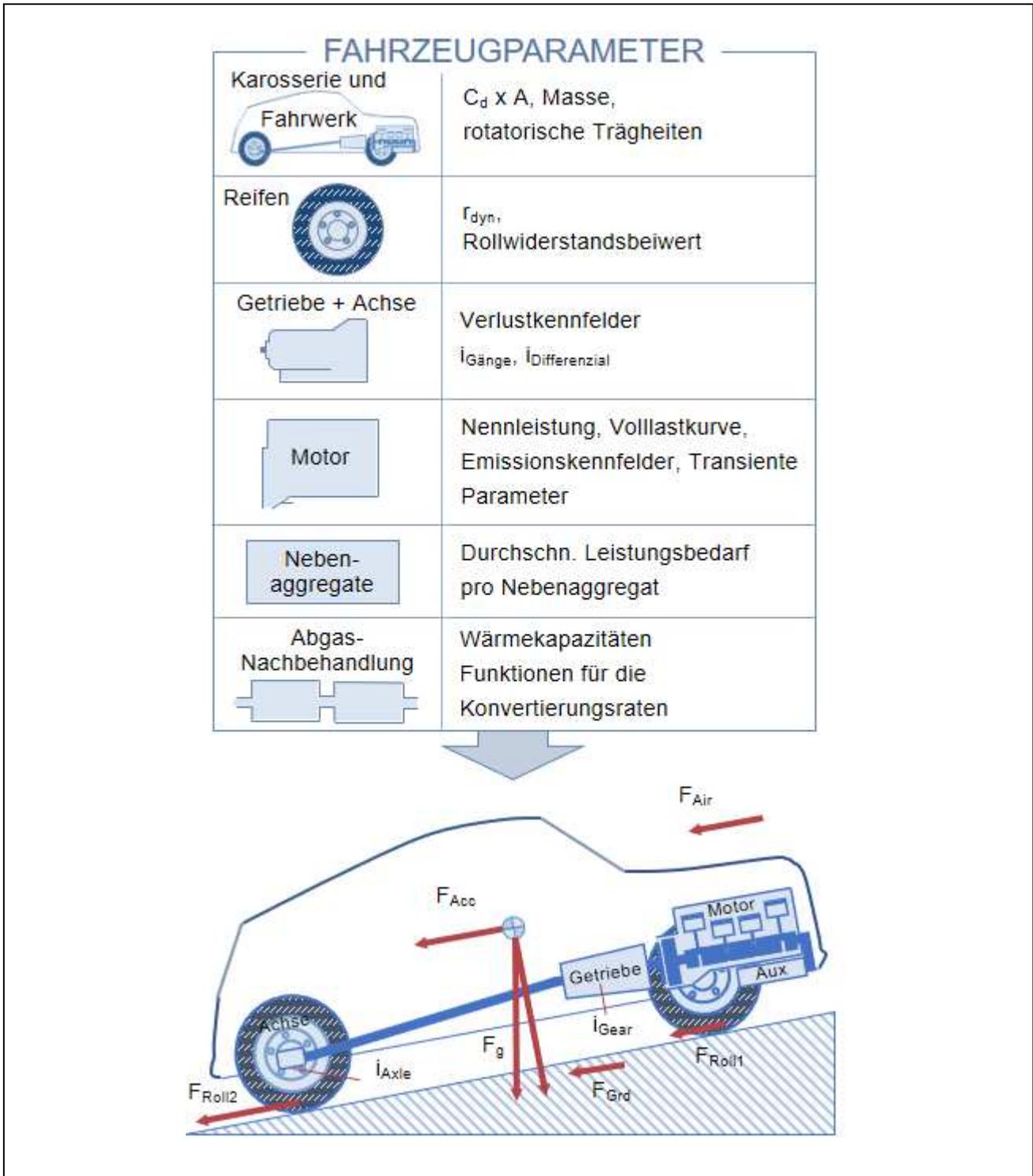


Abbildung 67: Zusammenfassung der Fahrzeugparameter (Hausberger et al. 2018)

Aus diesen Daten zu Fahrzeug und Antrieb wird die Antriebsleistung pro Sekunde für den jeweiligen Fahrzyklus berechnet. Anhand der berechneten Leistung und Motordrehzahl werden die Emissionen im Emissionskennfeld des Motors bestimmt.

Die geschätzte Leistung für Nebenaggregate in der Simulation ist in Tabelle 48 dargestellt. Im Handbook Emission Factors for Road Transport (Handbuch Emissionsfaktoren für den Straßenverkehr, HBEFA: <http://www.hbefa.net/e/index.html>) Studie 3.3 beträgt die Leistung 1,204 kW für die Nebenaggregate eines herkömmlichen Pkw. Für Batterie-Elektrofahrzeuge (BEV) und Brennstoffzellen-Fahrzeuge (FCV) in Mitteleuropa wurde eine zusätzliche Leistung von 300 W angenommen, da die Kabine elektrisch beheizt wird. Für die Kühlung der Kabine wird ein äquivalenter Leistungsbedarf geschätzt, der bereits durch den Basisleistungsbedarf der Nebenaggregate eines konventionellen Pkw gedeckt ist.

Für einen PHEV kam unter Annahme eines Anteils von 50:50 für das Fahren mit ICE und E-Motor ein zusätzlicher Bedarf von 150 W für die Nebenaggregate hinzu.

Tabelle 48: Schätzung der Leistung für Nebenaggregate (Hausberger et al 2018)

Leistung für Nebenaggregate [kW]		Anmerkung
ICE	1,204	nach HBEFA-Studie 3.3
BEV & FCEV	1,504	plus 300 W für elektrische Heizung und Kühlung ⁽¹⁾
PHEV	1,354	plus 150 W

(1) Der Energiebedarf für Heizung und Kühlung wurde für ein BEV auf Basis einer stündlichen Temperaturkurve für Mitteleuropa berechnet.

9.5.4 Fahrzyklus

Für die Simulation wurde ein Real World Cycle (RWC) verwendet, der im Wesentlichen der Standardstrecke zur Messung der realen Fahremissionen (RDE) am Institut für Verbrennungskraftmaschinen und Thermodynamik der Technischen Universität Graz entspricht. Dieser RWC erfüllt die Anforderungen an die RDE-konforme Strecke und enthält einen Mix von ca. 1/3 Stadt-, Landstraßen- und Autobahnfahrten. Die ca. 85 km lange Strecke weist Steigungen von bis zu 10 % und Gefälle von bis zu 6 % auf. Dieser Zyklus ist in erster Linie repräsentativ für die durchschnittliche Fahrzeugnutzung, für die der RWC-Zyklus mit Geschwindigkeit und Streckenneigung (Steigung/Gefälle) über die Zeit in Abbildung 68 dargestellt ist.

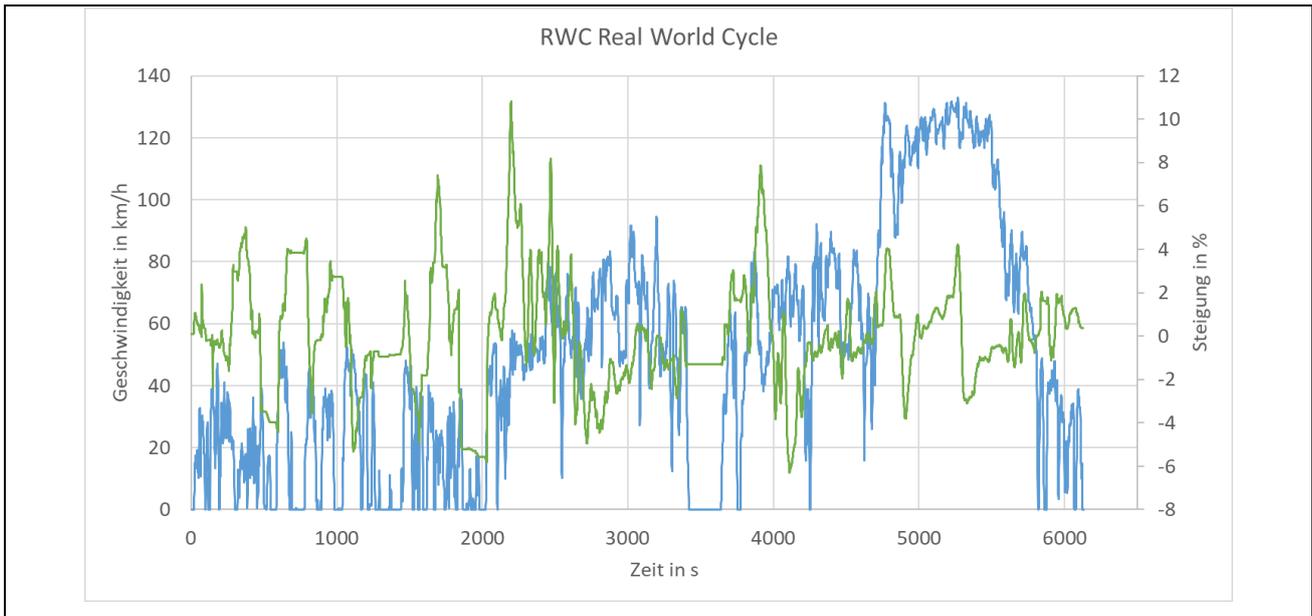


Abbildung 68: RWC-Zyklus für die Simulation

9.5.5 Emissionskennfelder in PHEM

Über die berechnete Leistung und Motordrehzahl werden die Emissionen anhand gegebener Motoremissionskennfelder berechnet. Für die Simulation in PHEM wurden die durchschnittlichen Emissionskennfelder und Vollastprofile aus dem Handbuch Emissionsfaktoren für den Straßenverkehr (HBEFA: <http://www.hbefa.net/e/index.html>) für EURO 6-Pkw verwendet.

9.6 Fahrzeugproduktion

In diesem Kapitel wird die Material- und Energiebilanz der gesamten Fahrzeugproduktion durch die Analyse von Basisfahrzeug, Verbrennungsmotor, Elektromotor, Batterie, Brennstoffzellensystem und Wasserstofftanksystem beschrieben.

9.6.1 Gewichtsschätzung von Fahrzeugen

Ausgehend von einem durchschnittlichen Mittelklassefahrzeug (z. B. VW Golf 7) wurden die Masse des Fahrzeugs analysiert und die Anteile für die folgenden Fahrzeugkomponenten geschätzt (Hausberger et al. 2018):

- Fahrwerk
- Antrieb
- Abgasnachbehandlung

- Tank- und Speichersysteme und
- Räder mit Felgen.

Anschließend erfolgte eine Schätzung der Materialzusammensetzung für diese Fahrzeugkomponenten.

Zuerst wurde die Masse des Basisfahrzeugs geschätzt, und darauf aufbauend wurden die einzelnen Komponenten der verschiedenen Antriebssysteme addiert, um die Masse der verschiedenen Fahrzeuge für die Simulation in PHEM zu erhalten. In *Tabelle 49* ist die Schätzung der Masse für das Basisfahrzeug für das Jahr 2018 dargestellt, die letztlich etwa 876 kg beträgt.

Tabelle 49: Schätzung der Fahrwerksmasse des Basisfahrzeugs (Hausberger et al. 2018)

Komponente	kg	Anmerkung
Mittelklasse-Pkw mit Ottomotor	1,211	Durchschnittliches Fahrzeug mit Ottomotor nach der HBEFA 3.3 (Handbuch für Emissionsfaktoren) Studie; DIN-Leergewicht ohne Zusatzausstattung und mit zu 90 % gefülltem Tank
Verbrennungsmotor	165	Annahme: Ottomotor
Abgasnachbehandlungssystem	15	Annahme: Abgasnachbehandlung des Ottomotors (3-Wege-Katalysator)
Tankvolumen	40	90 % gefüllt nach DIN-Definition Masse, angenommenes Tankvolumen 60 l, Kraftstoffdaten nach EUCAR
Kraftstoffspeichersystem	15	Annahme
Räder mit Felgen	85	Annahme
Fahrwerk des Basisfahrzeugs 2018	876	

Basierend auf der Fahrwerksmasse des Basisfahrzeugs wird die Gesamtmasse für die verschiedenen Fahrzeugkonzepte geschätzt. Berücksichtigt werden die folgenden Antriebssysteme:

- ICE – Verbrennungsmotor
- BEV – Batterie-Elektrofahrzeug

- HFC – Wasserstoffbrennstoffzelle
- PHEV – Plug-in-Hybrid

Das Verfahren der Massenschätzung, das einen fairen Vergleich zwischen den verschiedenen Antriebssystemen gewährleistet, wird am Beispiel des PHEV mit Diesel-ICE gezeigt. Das Antriebssystem des PHEV besteht aus den in [Abbildung 69](#) dargestellten Komponenten. Im Gegensatz zu einem HEV ist die Batterie eines PHEVs größer und kann mit Netzstrom geladen werden.

Das Antriebssystem des PHEV mit Diesel-ICE besteht aus folgenden Komponenten:

- Diesel-ICE
- Elektromotor
- Hochleistungsbatterie
- Umrichter
- Gleichspannungswandler

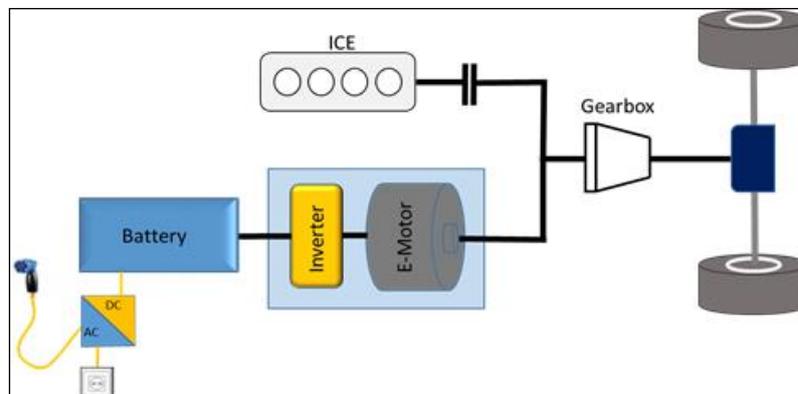


Abbildung 69: Schema der Komponenten des Antriebssystems in einem PHEV

Im Gegensatz zu einem ICE- oder HEV-Fahrzeug sind zusätzlich auch mehr Kabel und eine Lademöglichkeit für die Batterie erforderlich. Die Schätzung der Massen der verschiedenen Komponenten erfolgte mit den in [Tabelle 50](#) dargestellten Parametern und Faktoren.

Die Masse des Elektromotors für die verschiedenen Antriebskonzepte wurde mit einer empirischen Formel der Technischen Universität Darmstadt geschätzt. Die Masse des Elektromotors korreliert mit der Nennleistung und dem Drehmoment, wie in [Abbildung 70](#) dargestellt. Für die

Massenberechnung wurde die Formel für die permanentenerregte Synchronmaschine (PSM) verwendet.

Mit diesen Parametern wurde die Masse der verschiedenen Komponenten geschätzt und dann die Masse des Basisfahrzeugs hinzuaddiert. Somit betrug die Gesamtmasse des PHEV-Fahrzeugs für die PHEM-Simulation in Tabelle 51 geschätzte 1.578 kg.

Diese für das PHEV dargestellte Schätzung wird ebenso für alle verschiedenen Antriebs- und Fahrzeugkonzepte durchgeführt, um die Gesamtmasse für die Simulation in PHEM zu berechnen. Die wichtigsten Parameter für die Schätzung der Masse der verschiedenen Komponenten sind in Tabelle 52 und Tabelle 53 dargestellt. Die geschätzte Masse der verschiedenen Komponenten ist aus Tabelle 54 und Tabelle 55 ersichtlich.

Tabelle 50: Parameter und Faktoren für die Schätzung der Masse der verschiedenen Komponenten des PHEV (Hausberger et al. 2018)

Komponente	Daten	Einheit	Anmerkungen/Quelle
Tankvolumen	40	[l]	Annahme
Batteriespannung	314	[V]	Nennspannung der Hochkapazitätsbatterie
Batteriekapazität	9.9	[kWh]	Basierend auf der Ricardo-Studie ¹ und typisch für aktuelle PHEVs
Batterieenergiedichte	80	[Wh/kg]	Quelle: EUCAR
Drehmoment Elektromotor	200	[Nm]	Typischer Stromwert
Leistung Elektromotor	60	[kW]	Typischer Stromwert
Leistung ICE	70	[kW]	Typischer Stromwert für ein neues Mittelklasse-PHEV

¹... Studie zur Schätzung der CO₂-Reduzierung durch künftige Technologien (2014)

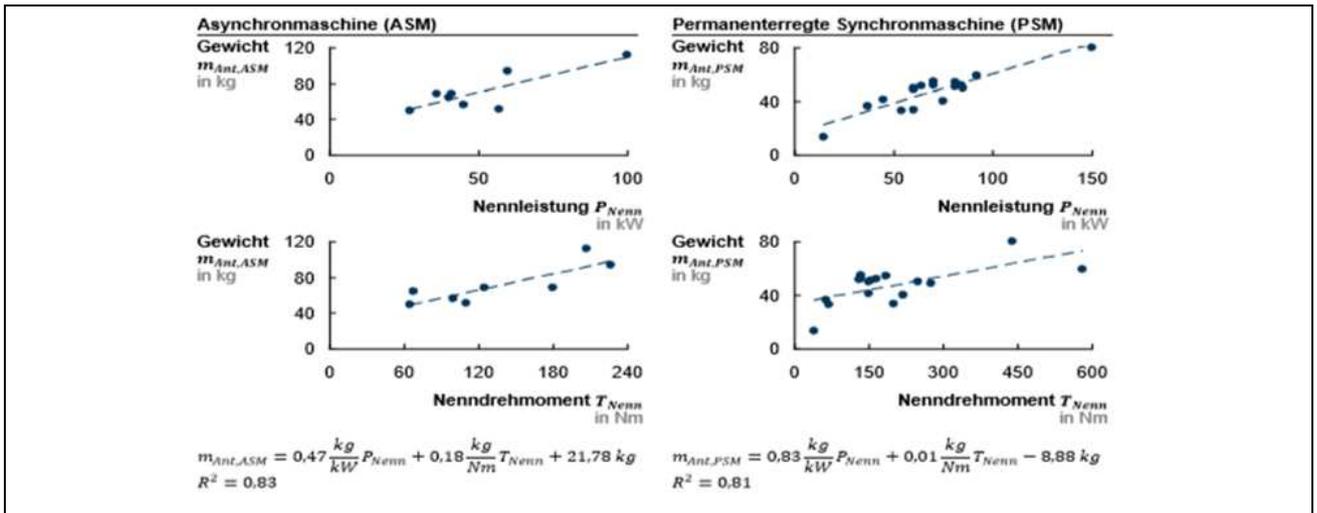


Abbildung 70: Modell zur Schätzung der Masse eines Elektromotors (Asynchronmaschine (ASM) und permanenterregte Synchronmaschine (PSM)) in Abhängigkeit von Leistung und Drehmoment

Table 51: Schätzung der Masse eines PHEV (Hausberger et al. 2018)

Komponente	kg	Anmerkungen
Fahrwerk des Basisfahrzeugs	876	Siehe <u>Table 49</u>
Räder mit Felgen	85	Annahme
Elektromotor	43	Berechnung von Leistung und Drehmoment eines Elektromotors mit der empirischen Formel (siehe <u>Abbildung 70</u>)
Gleichspannungswandler	5	Annahme
Umrichter	7	Annahme
Zusätzliche Verkabelung	56	Annahme: 20 m zusätzliche Kupferkabel mit 20 mm Durchmesser
Ladegerät	12	Annahme
Hochkapazitätsbatterie	124	Berechnet mit Kapazität und Energiedichte der Batterie
Abgasnachbehandlung	45	Für einen Diesel (z. B. DOC, DPF, SCR)
Diesel-ICE	215	Annahme
Tankfüllung (flüssig)	30	Füllstand 90 %
Kraftstofftank	15	Annahme für flüssigen Kraftstoff
Zusätzliche Ausstattung	65	Annahme
Gesamtmasse PHEV	1.578	Berechnet

*Tabelle 52: Schätzung von Parametern für verschiedene Komponenten (FCEV, HEV, BEV)
(Hausberger et al. 2018)*

Komp./Parameter	Größe	für Fzg.-Technologie	Einheit
Spez. Gewicht Kraftstoffspeicher / Tank	0.65	FCEV	kW/kg
Spez. Gewicht Kraftstoffspeicher / Tank	0.6		kW/l
Tankvolumen	140		l
Batteriekapazität	1.25		kWh
Batteriespannung (Nominalspannung)	320		V
Energiedichte Batterie	80		Wh/kg
Energiedichte Brennstoffzelle	650		Wh/kg
Spannungswandler	5		kg
Umrichter	7.5		
Drehmoment E-Motor	300		Nm
Leistung E-Motor	90		kW
Nenn Drehzahl E-Motor	2865		U/min
Leistung Brennstoffzelle	90		kW
Tankvolumen	40		HEV
Batteriekapazität	1.5	kWh	
Energiedichte Batterie	50	Wh/kg	
Batteriespannung (Nominalspannung)	250	V	
Spannungswandler	5	kg	
Umrichter	7.5	kg	
Drehmoment E-Motor	200	Nm	
Leistung E-Motor	25	kW	
Nenn Drehzahl E-Motor	1194	U/min	
Leistung ICE	70	kW	
Batteriekapazität	35	BEV	kWh
Batteriespannung (Nominalspannung)	350		V
Energiedichte Batterie	110		Wh/kg
Umrichter	10		kg
Spannungswandler	5		kg
Ladegerät	12		kg
Drehmoment E-Motor	300		Nm
Nenn Drehzahl E-Motor	2865		U/min
Leistung E-Motor	90	kW	

Tabelle 53: Schätzung von Parametern für verschiedene Komponenten (PHEV, CNG, Benzin- und Diesel-ICE) (Hausberger et al. 2018)

Tankvolumen	40	PHEV	l
Batteriespannung (Nominalspannung)	314		V
Batteriekapazität	9.9		kWh
Energiedichte Batterie	80		Wh/kg
Umrichter	7.5		kg
Spannungswandler	5		kg
Ladegerät	12		kg
Drehmoment E-Motor	200		Nm
Leistung E-Motor	60		kW
Nenn Drehzahl E-Motor	2865		U/min
Leistung ICE	70		kW
Tankvolumen Flüssig	50		CNG
Tankvolumen Gas	15	kg	
Spez. Gewicht Kraftstoffspeicher / Tank Gas	0.75	kg/l	
Batteriekapazität	0.8	kWh	
Tankvolumen	60	Otto / Diesel	l
Energiedichte Batterie	40		Wh/kg
Batteriekapazität	0.6		kWh
ICE (Internal Combustion Engine inkl. Getriebe)	165	Otto	kg
	215	Diesel	
Abgasnachbehandlungssystem	15	Otto	
	45	Diesel	
Kraftstoffspeicher / Tank	15	Otto & Diesel	
Masse 4 Räder + Felgen	85	alle	
Zusätzliche Verkabelung Länge	20	BEV, PHEV, FCEV, HEV	m
Kabeldurchmesser	20		mm
Dichte Kupfer	8.94		kg/dm ³

Tabelle 54: Geschätzte Massen von Fahrzeugkomponenten (BEV, HEV und FCHV) (Hausberger et al. 2018)

Komponente / Parameter	Gewicht in kg	Fzg. Technologie
Karosserie Basisfahrzeug	876	FCEV
Kraftstoffspeicher / Tank	138	
Räder + Felgen	85	
Tankinhalt H ₂ (halb voll)	2.7	
zusätzliche Verkabelung	56	
Spannungswandler	5	
Umrichter	7.5	
Batterie	16	
Brennstoffzelle	138	
E-Motor	69	
Masse Basisfahrzeug	1394	
Karosserie Basisfahrzeug	876	HEV_G
Kraftstoffspeicher / Tank	15	
Räder + Felgen	85	
ICE (Otto)	165	
E-Motor	14	
Spannungswandler	5	
Umrichter	7.5	
zusätzliche Verkabelung	56	
Batterie	30	
Abgasnachbehandlung (Otto)	15	
Tankinhalt (Otto, halb voll)	15	
Masse Basisfahrzeug	1283	
Karosserie Basisfahrzeug	876	BEV
Räder + Felgen	85	
E-Motor	69	
Spannungswandler	5	
Umrichter	10	
zusätzliche Verkabelung	56	
Ladegerät	12	
Batterie	318	
Masse Basisfahrzeug	1431	

Tabelle 55: Geschätzte Massen von Fahrzeugkomponenten (PHEV, CNG, Otto- und Diesel-ICE) (Hausberger et al. 2018)

Karosserie Basisfahrzeug	876	PHEV_G
Räder + Felgen	85	
E-Motor	43	
Spannungswandler	5	
Umrichter	7,5	
zusätzliche Verkabelung	56	
Ladegerät	12	
Batterie	124	
Abgasnachbehandlung (Otto)	15	
ICE (Otto)	165	
Tankinhalt (Otto, halb voll)	15	
Kraftstoffspeicher / Tank	15	
Masse Basisfahrzeug	1418	
Karosserie Basisfahrzeug	876	CNG
Räder + Felgen	85	
ICE (Otto)	165	
Kraftstoffspeicher / Tank CH ₄	11	
Kraftstoffpeicher / Tank Otto	15	
Tankinhalt (Otto, halb voll)	19	
Tankinhalt (CH ₄ halb voll)	7,5	
Abgasnachbehandlung (Otto)	15	
Batterie	15	
Masse Basisfahrzeug	1208	
Karosserie Basisfahrzeug	876	Otto
Räder + Felgen	85	
Batterie	15	
Kraftstoffspeicher / Tank	15	
Tankinhalt (Otto, halb voll)	22	
Abgasnachbehandlung (Otto)	15	
ICE (Otto)	165	
Masse Basisfahrzeug	1193	
Karosserie Basisfahrzeug	876	Diesel
Räder + Felgen	85	
Batterie	15	
Kraftstoffspeicher / Tank	15	
Tankinhalt (Diesel, halb voll)	25	
Abgasnachbehandlung (Diesel)	45	
ICE (Diesel)	215	
Masse Basisfahrzeug	1276	

Die geschätzte Gesamtmasse der jeweiligen Fahrzeuge ist aus [Tabelle 56](#) ersichtlich. Für die Ladungsmasse wurde von 1,3 Personen als Pkw-Insassen mit einem Gewicht von je 75 kg und 25 kg Gepäck ausgegangen. Die Gesamtmasse für die PHEM-Simulation ist die Masse des

Fahrzeugs plus Ladungsmasse. Die Gesamtantriebsleistung von ICE, BEV und FCEV betrug jeweils 90 kW. Für das PHEV wurde eine höhere Leistung angenommen, da das Fahrzeug entweder vom ICE oder vom Elektromotor angetrieben werden kann. Die angenommene Mindestreichweite des BEV betrug 300 km.

Tabelle 56: Leistung und Masse der verschiedenen Fahrzeug- und Antriebssysteme (Hausberger et al. 2018)

Fahrzeugantriebssystem	Fahrzeugmasse für PHEM [kg]	Nennleistung ICE [kW]	Nennleistung Elektromotor/Brennstoffzelle [kW]
Diesel-ICE	1.361	90	-
Benzin-ICE	1.276	90	-
CNG-ICE	1.301	90	-
Diesel-HYB	1.443	70	25
Benzin-HYB	1.360	70	25
Diesel-PHEV	1.578	70	60
Benzin-PHEV	1.495	70	60
FCEV	1.461	-	90
BEV	1.496	-	90

9.6.2 Materialmix der Fahrzeuge

Der Materialmix wurde auf Basis der Daten des aktuellen VW Golf 7 analysiert und geschätzt. Zusätzlich wurden die folgenden Quellen verwendet:

- Friedrich H. (2017). Zur Zukunft der Mobilität: Randbedingungen, Fahrzeugkonzepte, Funktionen und Technologien. Vortrag bei “ Nachhaltigkeit und Mobilität in der gebauten Umwelt.” 13. Juli 2017, Rottweil, Deutschland.
- Thaden G. et al. (2017). Automotive metal components for car bodies and chassis. Global market study. Roland Berger, Automotive Competence Center. London, UK.
- Online-Artikel (2018): Aluminum wrestles with steel over electric vehicle market. Veröffentlicht 27. März 2018. <https://www.reuters.com/article/us-autos-metals-electric-vehicles-analys/aluminum-wrestles-with-steel-over-electric-vehicle-market-idUSKBN1H31M7>

- Online-Artikel (2012): Benchmarking Golf VI. Veröffentlicht 2012. www.plastics.gl/automotive/benchmarking-golf-vii/
- <https://portal.a2mac1.com> (Automotive Benchmarking)

Hauptergebnis der Literaturrecherche war, dass im Segment des aktuellen VW Golf keine signifikante Veränderung des Materialmixes zu erwarten ist. Das Problem der Gewichtsreduzierung infolge des zusätzlichen Gewichts der Batterie im BEV wird künftig – so die aktuelle Fachdiskussion – mit einem Materialmix aus hoch- und höchstfestem Stahl mit Aluminiumanteilen und konstruktiven Verbesserungen gelöst werden (siehe Abbildung 71). Höhere Anteile von Aluminium und teuren Materialien wie Magnesium- und Kohlefaserverbundwerkstoffen werden für die oberen Fahrzeugklassen zunehmend an Bedeutung gewinnen.

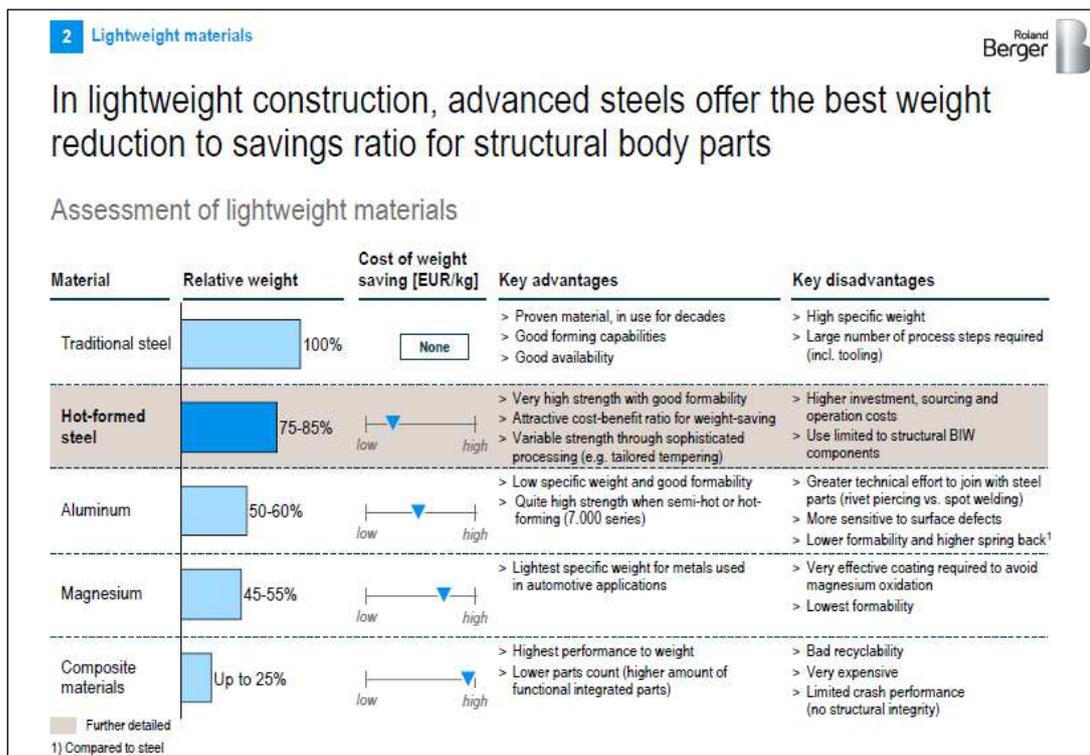


Abbildung 71: Vor- und Nachteile verschiedener Leichtbauwerkstoffe

9.6.3 Energiebedarf in der Fahrzeugfertigung

Der Energiebedarf für die Basisfahrzeugfertigung im Automobilwerk wird anhand des VW-Nachhaltigkeitsberichts

(https://www.volkswagenag.com/presence/nachhaltigkeit/documents/sustainability-report/2018/Nichtfinanzieller_Bericht_2018_d.pdf) wie folgt geschätzt:

- Strom: 1.060 kWh/Fahrzeug
- Wärme: 587 kWh/Fahrzeug
- Erdgas: 421 kWh/Fahrzeug

9.6.4 Brennstoffzelle und Wasserstofftank

Zur Umweltbewertung der Wasserstoffbrennstoffzelle wurden die folgenden Referenzen herangezogen:

- Garche S. (2018). Wasserstoff & Brennstoffzelle – Quantensprung im Umwelt- und Klimaschutz?, Präsentation. 8.6.2018. Velden, Österreich.
- Hartmann U. (2017). Sustainability management and environment @ Daimler. Vortrag, SRI Conference. 7. Februar 2017. Frankfurt, Deutschland.
- Tokieda J. (2015). The Mirai Life Cycle Assessment Report. Toyota Motor Company.
- Toyota. (2018). Toyota Mirai. Broschüre. Toyota Motor Corporation. Japan.
- Notter D. et al. (2015). Life cycle assessment of PEM FC applications. Energy and Environmental Science. Nr. 7, 2015.
- Evangelisti S., Tagliaferri C. Lettieri P. (2017). Life cycle assessment of a polymer electrolyte membrane fuel cell system for passenger vehicles. Journal of Cleaner Production, Vol 142, Part 4. Jan 2017.
- Mitzel J. et al. (2017). Wasserstoff und Brennstoffzellen. Artikel in BWK Bd. 69 (2017) Nr. 5, S.124 - 134.
- Simons A., Bauer C. (2015). A life-cycle perspective on automotive fuel cells. Applied Energy, 157. März 2015.

Abbildung 72 zeigt den Hauptprozess zur Fertigung eines PEM-Brennstoffzellensystems für Pkw.

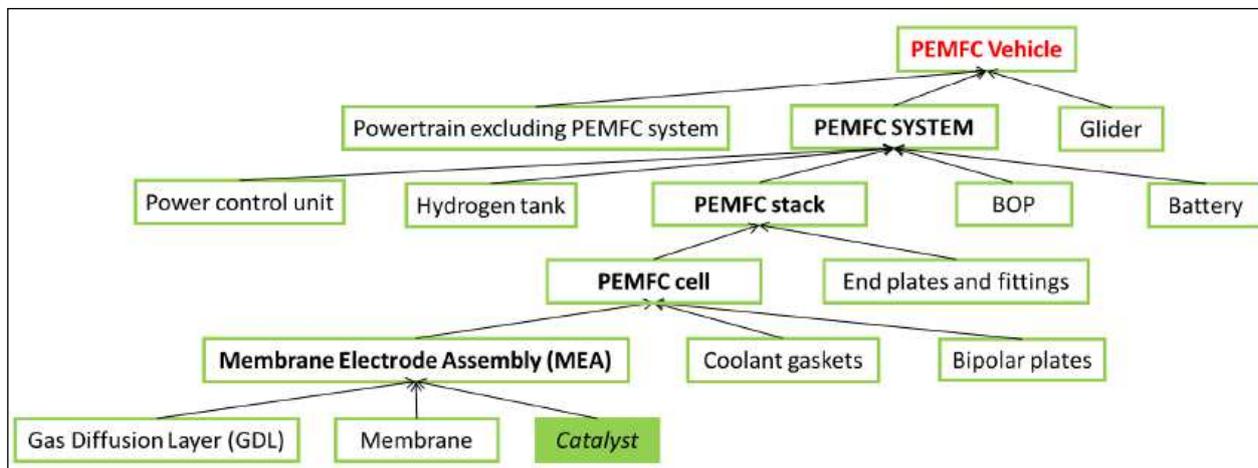


Abbildung 72: Schema der Fertigungsprozesse für eine PEM-Brennstoffzelle (Evangelisti 2017)

Die Gesamtmasse eines PEM-Brennstoffzellensystems mit 90 kW wird von der Technischen Universität Graz auf etwa 138 kg geschätzt (Hausberger et al. 2018). Für den 90-kW-Brennstoffzellenstapel werden 14 g Platinbeladung angenommen (Evangelisti 2017). Bei der Brennstoffzelle des Mercedes GLC F-Cell sind es 20 g Platin für 150 kW (Hartmann 2017). Im Toyota Mirai liegen 30 g Platin für 90 kW vor. Schätzungen nach dem derzeitigen Stand der Technik gehen von einer Platinbeladung zwischen 10 - 12 g für einen 100-kW-Brennstoffzellenstapel aus (Garche 2018).

Für das aktuelle Modell des Toyota Mirai wird die Masse des Brennstoffzellenstapels inkl. Gehäuse auf 56 kg geschätzt (Toyota 2018). Die geringere Masse ist auf die Verwendung von Titan anstelle von Stahl für die Separatoren (Bipolarplatten) und das Aluminiumgehäuse anstelle von Stahl zurückzuführen. Diese Maßnahmen führten zu einer Massereduzierung von rund 42 % gegenüber dem Vorgängermodell⁶. Zusätzlich beinhaltet die Massebilanz von Toyota keine zusätzlichen Aggregate wie Lüfter, Pumpen und Steuermodule.

Der Anteil der Gesamtmasse eines Brennstoffzellensystems ist in Abbildung 73 dargestellt. Etwa 2/3 der Masse machen die aus Stahl gefertigten Separatoren (Bipolarplatten) der Zellen aus. Der

⁶ <https://www.greencarcongress.com/2015/04/20150429-mirai.html>

Anteil der gesamten Treibhausgasemissionen des Brennstoffzellensystems von 835 kg CO₂-Äq. ist in Abbildung 74 dargestellt. Etwa 50 % werden durch den platinbasierten Katalysator verursacht.

Die Masse des Wasserstoff-Kraftstofftanks aus Kohlefasern wird auf 138 kg geschätzt (Hausberger et al. 2018).

Der Energiebedarf für die Herstellung der Brennstoffzelle beträgt etwa 11 kWh Strom pro kW Brennstoffzellenleistung; beim Wasserstofftank sind es 4,5 kWh (Evangelisti 2017).

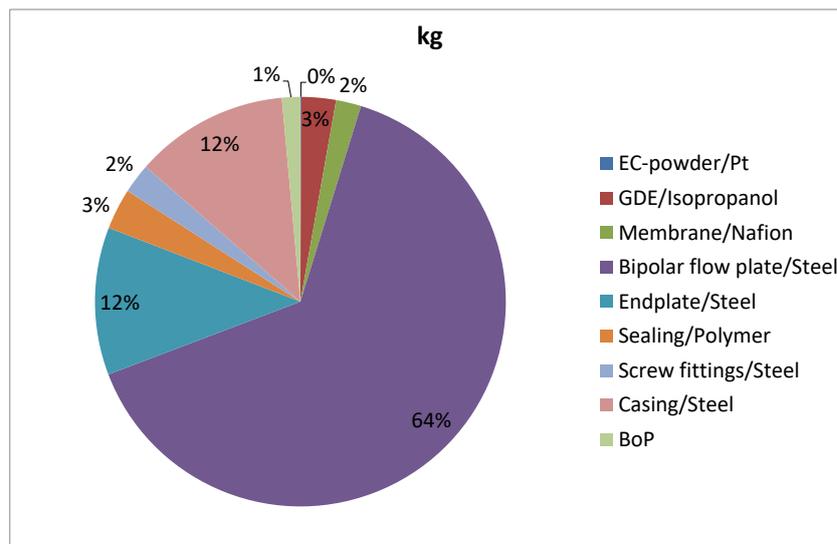


Abbildung 73: Masseanteile des PEM-Brennstoffzellensystems (Evangelisti 2017)

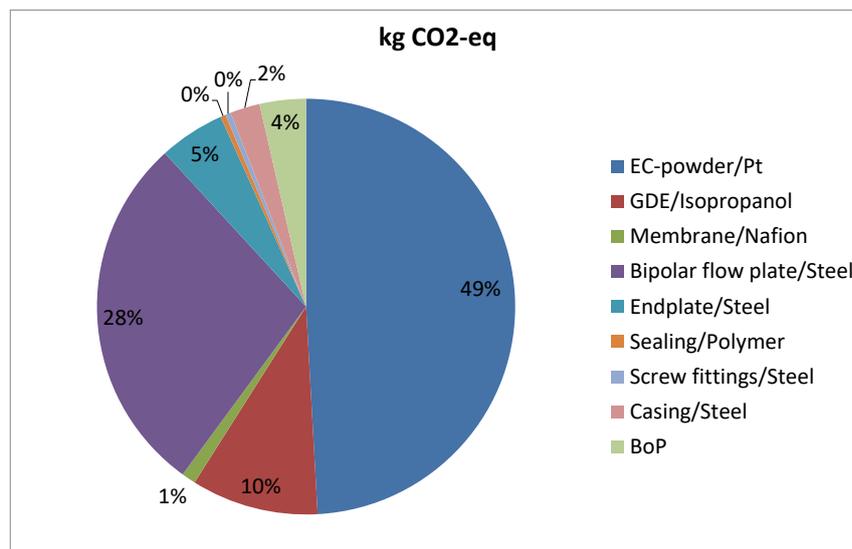


Abbildung 74: Anteil der Fertigung eines PEM-Brennstoffzellensystems an den Treibhausgasemissionen

9.7 Ladeinfrastruktur für Elektrofahrzeuge

Der Schwerpunkt der Analyse der Ladeinfrastruktur lag auf den Energieverlusten beim aktuellen Schnellladen mit 50 kW Gleichstrom nach dem Stand der Technik.

Abbildung 75 zeigt eine Übersicht aktueller Ladesysteme mit unterschiedlicher Ladeleistung.

Mode 1 AC On-board		Max 16 A and 230 V AC, single-phase / 3,7 kW Max 16 A and 400 V AC, three-phase / 11 kW	Type 1 (1-phasig) Type 2 (3-phasig)
Mode 2 AC On-board		Max 32 A and 230 V AC, single-phase / 7,4 kW Max 32 A and 400 V AC, three-phase / 22 kW	Type 1 (1-phasig)* Type 2 (3-phasig)
Privates Laden			
Mode 3 AC On-board		Max 63 A and 400 V AC, three-phase / 43 kW	Type 2
Öffentl. Ladestation			
Mode 4 DC Off-board		50 kW, 100 kW, >100 kW	Type 2 CCS Chademo
<p>Ladeleistung bei Einphasenwechselstrom: Ladeleistung (3,7 kW) = Phasen (1) * Spannung (230 V) * Stromstärke (16 A)</p> <p>Ladeleistung bei Drehstrom, Dreiphasenwechselstrom mit Sternschaltung: Ladeleistung (22 kW) = Phasen (3) * Spannung (230 V) * Stromstärke (32 A)</p> <p>Ladeleistung bei Drehstrom, Dreiphasenwechselstrom mit Dreieckschaltung: Ladeleistung (22 kW) = Wurzel (3) * Spannung (400 V) * Stromstärke (32 A)</p>		<p>CCS steht für Combined Charging System und das ist derzeit weltweit das einzige standardisierte Ladesystem seiner Art. Es erlaubt das Laden mit Wechsel- oder Gleichstrom über eine einheitliche Ladeschnittstelle, den sogenannten Combo-Stecker.</p> <p>Chademo aus Asien, v.a. asiat. Fahrzeuge</p>	
* Nicht in Österreich			

Abbildung 75: Ladeverluste und Steckersysteme von On-Board- und Off-Board- Ladesystemen

Ein umfassendes Bewertungsprogramm für Ladungsverluste wird derzeit von der GFS durchgeführt⁷. Die vorläufigen Ergebnisse der Kontrolle einer DC-Ladestation mit 50 kW sind (Abbildung 76):

- Die Verluste der derzeit verfügbaren DC-Ladestationen (50 kW Spitzenleistung) liegen zwischen 8 und 11 %.
- Der Haupteinfluss auf die Verluste ist die tatsächlich verbrauchte Leistung im Verhältnis zur Nennleistung. Beim tatsächlichen Laden mit nur 10 % der Nennleistung können die Energieverluste bis zu 50 % betragen.

⁷ Scholz H. (2017). Stand-by power consumption, efficiency under operational load and EMC of DC chargers for EVs. Präsentation im Expertenworkshop zur Energieeffizienz von EVSE, Wien 2017.

- Die geringe tatsächliche Ladeleistung kann verschiedene Gründe haben: niedrige Außentemperatur, Anforderungen an die Ladesteuerung des Fahrzeugs (z. B. Begrenzung der Schnellladezyklen wegen der Lebensdauer der Batterie), Ladeleistung des Batterietyps.
- Aufgrund des zunehmenden Einsatzes von Schnellladestationen mit mehr als 100 kW (z. B. Iony-HPC-Station mit bis zu 350 kW⁸) werden die Ladeverluste mit der Technik von heute voraussichtlich weiter zunehmen.⁹

CCS BMW i3:
Efficiency measurements of charging columns

Chargers	25°C		40°C		-20°C	
	Efficiency	Power	Efficiency	Power	Efficiency	Power
A	90.38%	40.3kW	90.35%	39.15kW	Out of order	
B	89.84%	44.47kW	89.87%	42.2kW	64.51%	6.52kW
C	Not tested: column out of order					
D	90.56%	46.40kW	90.89%	45.06kW	78.84%	7.55kW

Values obtained from the median of the stable charging conditions.



CHAdeMO NISSAN LEAF:
Efficiency measurements of charging columns

Chargers	25°C		40°C		-15°C		-25°C	
	Efficiency...	...@ Power	Efficiency...	...@ Power	Efficiency...	...@ Power	Efficiency...	...@ Power
A	90.8%	40.37kW	91.18%	40.2kW	36.26%	4.18kW	Out of order	Out of order
B	91.47%	48.24kW	89.13%	47.35kW	Not tested	Not tested	56.65%	4.1kW
C	91.76%	37.61kW	92.4%	37.36kW	89.5%	21.21kW	Out of order	Out of order
D	92%	47.09kW	91.21%	45.9kW	Not tested	Not tested	72.83%	4.42kW
E	92.1%	45.77kW	to be tested		to be tested		to be tested	
F	to be tested		to be tested		84.15%	22.95kW	51.5%	5.15kW
G	90.48%	45.45kW	to be tested		Out of order	Out of order	Out of order	Out of order

Values obtained from the median of the maximum stable charging conditions.



Abbildung 76: Wirkungsgrade von DC-Ladestationen mit 50 kW¹⁴

Zum Vergleich: Das Unternehmen Smatrics¹⁰ geht bei seinen AC (22 kW)-/DC (50 kW)-Ladestationen von etwa 17 % Ladeverlusten aus.

⁸ https://www.ots.at/presseaussendung/OTS_20181018_OT0032/omv-und-ionity-eroeffnen-die-ersten-350-kw-high-power-ladestationen-in-oesterreich

⁹ Apostolaki-Iosifidou E. et al. (2017). Measurement of power loss during electric vehicle charging and discharging. <http://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2017.03.015>

¹⁰ Smatrics (2017). Präsentation im Expertenworkshop zur Energieeffizienz von EVSE, Wien 2017.

10. Anhang II: Vergleich der Treibhausgasemissionen der Stromerzeugung

10.1 Einleitung

In diesem Anhang werden die anhand des aktuellen (2018) Strommixes in Österreich, Deutschland und der Schweiz ermittelten Treibhausgasemissionen mit den derzeit in diesen Ländern verwendeten Daten für die Treibhausgasemissionen verglichen, die (teilweise) von den Umweltbehörden (Umweltbundesamt in Österreich und Deutschland) und dem Bundesamt für Energie BFE in der Schweiz veröffentlicht werden („offizielle Daten“). Für diesen Vergleich wurden diese Organisationen direkt kontaktiert, um die notwendigen Hintergrundinformationen über die Berechnungsmethode und die verwendeten Daten für die Treibhausgasemissionen des Strommixes zu erhalten. Generell war es schwierig, umfassende und vollständige Informationen über die Berechnungsmethode und die Datennutzung zu erhalten.

Die verfügbaren Informationen wurden verwendet, um die Treibhausgasemissionen mit der Berechnung im LCA-Tool zu vergleichen, das im Hauptbericht beschrieben ist. Für den Vergleich und zum Verständnis möglicher Unterschiede wurden die folgenden Aspekte berücksichtigt:

- Referenzen
- Bezugsjahr für den Strommix: 2019
- Methodischer Ansatz: LCA
- Berücksichtigte Treibhausgase: CO₂, CH₄ und N₂O
- Anteil der Energieträger am inländischen Strommix (siehe Tabelle 57 aus den IEA-Statistiken)
- Berücksichtigung von Stromimporten und -exporten: Nettoimport als Differenz von importiertem und exportiertem Strom
- Stromnetzverluste: 5,5 %/100 km
- Bereitstellung von parallel erzeugter Wärme für Fernwärme in thermischen Kraftwerken: Energieverteilung auf Basis der IEA-Energiestatistik für Fernwärme- und Stromerzeugung in thermischen KWK-Anlagen

- Treibhausgasemissionen des inländischen Strommixes: siehe [Tabelle 57](#) basierend auf generischen Kraftwerkstypen und Standarddaten verschiedener Kraftwerke
- Treibhausgasemissionen aus importiertem Strommix: zusätzlicher Strom aus Kraftwerken, die mit fossiler und nuklearer Energie im europäischen Mix 2018 betrieben werden: 590 g CO₂-Äq./kWh (EU-2018)
- Treibhausgasemissionen aus dem Verbrauchsstrommix: siehe [Tabelle 57](#)
- Zusammenfassung der Hauptunterschiede

10.2 Vergleich

10.2.1 Zusammenfassung des Vergleichs aller Länder

Aus [Tabelle 57](#) sind die Zusammenfassung der Parameter und der Vergleich für die verschiedenen Aspekte ersichtlich, die im folgenden Kapitel für jedes Land näher beschrieben werden. Dieser Vergleich ging auch den Kollegen/Kolleginnen aus AT (Werner Pölz, UBA Wien), DE (Petra Icha, UBA DE) und CH (Stephan Walter, BFE, Philippe Stolz, treeze) zu, deren Rückmeldungen berücksichtigt wurden.

Tabelle 57: Zusammenfassung der Parameter und Vergleich

	AT		DE		CH	
	LCA tool	UBA AT	LCA tool	UBA DE	LCA tool	treeze/BFE
reference year	2018	2017	2018	2015	2018	2014
methodology	LCA	LCA	LCA	LCA	LCA	LCA
GHG gases	CO2, CH4, N2O	CO2, CH4, N2O (if CO2eq from GEMIS: as in DE)	CO2, CH4, N2O	CO2, CH4, N2O, Perfluorethan, Perfluormethan	CO2, CH4, N2O	CO2, CH4, N2O, SF6
national electricity production						
coal	5.3%	5.5%	35.7%	42.3%	0%	0%
oil	1.0%	1.2%	0.9%	0.8%	0.1%	0.04%
natural gas	14.8%	16.2%	12.6%	11.5%	1.4%	0.8%
nuclear	0%	0%	11.6%	14.2%	36.1%	37.6%
biomass	7.2%	7.5%	8.3%	6.6%	2.4%	2.4%
hydro	60.7%	57.6%	3.6%	3.0%	55.3%	56.0%
wind	8.2%	8.6%	18.3%	13.6%	0.2%	0.1%
PV	1.8%	1.9%	7.5%	6.0%	2.8%	1.2%
waste	1.0%	1.6%	1.1%	1.8%	1.7%	1.9%
other			0.3%	0.2%		
	100%	100%	100%	100%	100%	100%
methodology in the consideration of electricity market	fossil & nuclear share of the European mix 2018	countries of origin (56% DE, 39% CZ, e-control 2017) ¹⁾	fossil & nuclear share of the European mix 2018	electricity trade balance Tab. 1 ⁴⁾	fossil & nuclear share of the European mix 2018	considering import and export according to electricity origin certificate
electricity market	net import (12%)	28% absolute, 15.6% net	no import because export higher than import	total electricity market (net export)	no import because export higher than import	total electricity market (net import)
consideration of coproduced heat in CHP plants	yes, energy allocation factor for electricity: 57%	no, info in mail or reports	yes, energy allocation factor for electricity: 82%	yes, applying the Finisch method ³⁾	no (not necessary because the share of calorific plants is very small)	no (not necessary because the share of calorific plants is very small)
net losses	5.5% (per 100km and abs.)	6% / 100km ²⁾	5.5% (per 100km and abs.)	5-6% ⁵⁾	5.5% (per 100km and abs.)	7% (table 2.1) ⁷⁾
share of import	12% (net)	28% (abs) ¹⁾ , 15.6% (net) ²⁾	0% (because import higher than export)	8% net export, p. 15 ⁴⁾	0% (because import higher than export)	30% ⁷⁾
greenhouse gas emissions of the the different electricity mix [gCO2eq/kWh]						
inland production mix	103 (169 without alloc.)	180 ²⁾	415 (500 without alloc.)	547 ⁶⁾	55	29.8 ⁷⁾
import mix	590	616 ²⁾	590	no info found	590	457
mix at the charging point	162	248 ²⁾	415	580 ³⁺⁵⁾	55	181.5 ⁷⁾
References	LCA tool calculations	UBA AT ¹⁾ Pözl, tel. & mails (16.7.)	LCA tool calculations	UBA DE ^{3, 4)} mails Gärtner & Niedermaier	LCA tool calculations	treeze ⁷⁾ mails Walter (BFE) and Stolz (treeze)

1) UBA AT Report "Treibhausgasemissionen von Strom, Empfehlungen zur Öko-Bilanzierung", Kranzl Sabine, 2018
2) Telefon call and mail with Pözl at 16.7.
3) UBA DE report "Emissionsbilanz erneuerbarer Energieträger", 23/2018, M. Memmler, T. Lauf
4) UBA DE report "Entwicklung der spez. Kohlendioxidemissionen des DE-Strommixes 1990-2018", Petra Icha, 2019
5) from Niedermaier's mail.
6) GEMIS IINAS 2016
7) treeze report "Umweltbilanz Strommix Schweiz 2014 v3.0" (Messmer, Frischknecht)

10.2.2 Österreich

Für den Vergleich und zum Verständnis möglicher Unterschiede werden die folgenden Aspekte beschrieben:

- Referenzen:
 - Persönliche Kommunikation mit Umweltbundesamt
 - On-line CO₂-Rechner des Umweltbundesamtes (<http://www5.umweltbundesamt.at/emas/co2mon/co2mon.htmlreports>)
 - UBA Wien, Bericht: „Treibhausgasemissionen von Strom, Empfehlungen zur Öko-Bilanzierung“, Kranzl Sabine, 2018
- Bezugsjahr für den Strommix: 2017
- Methodischer Ansatz: LCA
- Berücksichtigte Treibhausgase: CO₂, CH₄ und N₂O
- Anteil der Energieträger am inländischen Strommix (siehe Tabelle 57): kaum Unterschiede zwischen 2017 und 2018
- Berücksichtigung von Stromimporten und -exporten: Anwendung der jährlichen Nettodifferenz aus importiertem und exportiertem Strom ergibt einen Stromimport von 15,6 %
- Stromnetzverluste: 6 % / 100 km
- Bereitstellung von parallel produzierter Wärme für Fernwärme in thermischen Kraftwerken: Endmethode und Emissionskataster werden angewendet, aber nicht detailliert ausgewiesen. Im LCA-Tool werden 43 % der Treibhausgasemissionen der parallel produzierten Wärme zugeordnet.
- Treibhausgasemissionen aus dem inländischen Strommix 2017: 180 g CO₂-Äq./kWh
- Treibhausgasemissionen aus dem importierten Strommix: 616 g CO₂-Äq./kWh, vorwiegend aus Deutschland und der Tschechischen Republik

- Treibhausgasemissionen aus dem verbrauchten Strommix: 248 g CO₂-Äq./kWh, aber schlechte Berichterstattung im CO₂-Rechner des Umweltbundesamtes (zusätzliche Informationen aus der Mail von Werner Pölz, UBA)
- Vergleich: Differenz zwischen 162 g CO₂-Äq./kWh und 248 g CO₂-Äq./kWh bedingt durch
 - Methodische Berücksichtigung der parallel produzierten Wärme
 - Unterschiede hinsichtlich der Daten für Kraftwerke, z. B. Wirkungsgrade

10.2.3 Deutschland

Für den Vergleich und zum Verständnis möglicher Unterschiede werden die folgenden Aspekte beschrieben:

- Referenzen:
 - Bericht des UBA DE: „Emissionsbilanz erneuerbarer Energieträger, 23/2018“, M. Memmler, T. Lauf
 - Bericht des UBA DE: „Entwicklung der spez. Kohlendioxidemissionen des DE-Strommixes“ 1990-2018, Petra Icha, 10/2019
 - Persönliche Kommunikation mit Umweltbundesamt
 - Persönliche Kommunikation mit ADAC
- Bezugsjahr für den Strommix: 2015
- Methodischer Ansatz: LCA
- Berücksichtigte Treibhausgase: CO₂, CH₄ und N₂O; möglicherweise stammen die CO₂-Äq.-Emissionen direkt aus der GEMIS-Datenbank, die auch Perfluorethan und Perfluormethan enthält
- Anteil der Energieträger am inländischen Strommix: siehe [Tabelle 57](#); seit 2015 Rückgang des Anteils von Kohlekraft und Anstieg des Anteils von Windkraft

- Berücksichtigung von Stromimporten und -exporten: Anwendung der jährlichen Nettodifferenz aus importiertem und exportiertem Strom ergibt einen Stromexport von 8 %, vorwiegend aus Windkraft und PV
- Stromnetzverluste: 5 - 6 % / 100 km
- Bereitstellung von parallel produzierter Wärme für Fernwärme in thermischen Kraftwerken: keine detaillierten Angaben, möglicherweise Anwendung der Endmethode. Ausgehend von der IEA-Statistik im LCA-Tool werden 18 % der Treibhausgasemissionen der parallel produzierten Wärme zugeordnet
- Treibhausgasemissionen aus dem inländischen Strommix 2015: 547 g CO₂-Äq./kWh (ohne Zuordnung der parallel produzierten Wärme im LCA-Tool: 500 g CO₂-Äq./kWh)
- Treibhausgasemissionen aus importiertem Strommix: nicht relevant, da die Nettobilanz des Stroms einen Export ergibt
- Treibhausgasemissionen aus dem verbrauchten Strommix: 580 g CO₂-Äq./kWh
- Vergleich: Differenz zwischen 415 g CO₂-Äq./kWh und 580 g CO₂-Äq./kWh bedingt durch
 - Unterschiede in der inländischen Stromerzeugung zwischen 2015 und 2018, z. B. geringerer Anteil an Kohle und höherer Anteil an Wind im Jahr 2018.
 - Berücksichtigung von Importen und Exporten nicht dokumentiert
 - Unklare methodische Berücksichtigung der parallel produzierten Wärme
 - Unterschiede hinsichtlich der Daten für Kraftwerke

10.2.4 Schweiz

Für den Vergleich und zum Verständnis möglicher Unterschiede werden die folgenden Aspekte beschrieben:

- Referenzen:
 - treeze-Bericht 2014 „Umweltbilanz Strommix Schweiz 2014 v3.0“ (Messmer et al. 2014)

- Persönliche Kommunikation mit BFE und treeze
- Bezugsjahr für den Strommix: 2014
- Methodischer Ansatz: LCA
- Berücksichtigte Treibhausgase: CO₂, CH₄, N₂O und SF₆; Einfluss von SF₆ aber sehr gering
- Anteil der Energieträger am inländischen Strommix (siehe Tabelle 57): kaum Unterschiede zwischen 2014 und 2018
- Berücksichtigung von Stromimporten und -exporten: Importe und Exporte gemäß Stromherkunftsnachweisen: Laut IEA-Statistiken 30 % im Jahr 2014 und kein Import im Jahr 2018
- Stromnetzverluste: 7 % gesamt
- Bereitstellung von parallel produzierter Wärme für Fernwärme in thermischen Kraftwerken: nicht relevant, da nahezu keine Fernwärme aus KWK-Anlagen
- Treibhausgasemissionen aus dem inländischen Strommix 2014: 30 g CO₂-Äq./kWh
- Treibhausgasemissionen aus importiertem Strommix: 457 g CO₂-Äq./kWh
- Treibhausgasemissionen aus dem verbrauchten Strommix: 182 g CO₂-Äq./kWh
- Vergleich: Differenz zwischen 55 g CO₂-Äq./kWh und 182 g CO₂-Äq./kWh bedingt durch
 - Vernachlässigung von Importen im LCA-Tool aufgrund der IEA-Datenquelle für 2018, wonach der Export im Jahr 2018 den Import überstieg. Laut treeze-Betrachtung von Importen und Exporten gemäß Stromherkunftsnachweisen 30 % im Jahr 2014
 - Unterschiede hinsichtlich der Daten für Kraftwerke: 55 g CO₂-Äq. gegenüber 30 g CO₂-Äq./kWh (insbesondere sind die Emissionen aus Kernenergie im treeze-Bericht deutlich niedriger als die im LCA-Tool berücksichtigten)

Abbildung 77, Abbildung 78 und Abbildung 79 zeigen den Vergleich der kumulierten Treibhausgasemissionen der PHEV- und BEV-Verkehrssysteme für die drei Länder Österreich,

Deutschland und Schweiz, wobei die unterschiedlichen Treibhausgasemissionen aus dem Tool und den oben beschriebenen „offiziellen Daten“ genutzt werden.

Abbildung 80, Abbildung 81 und Abbildung 82 zeigen den Vergleich der geschätzten Treibhausgasemissionen pro Kilometer für die unterschiedlichen Strommixe.

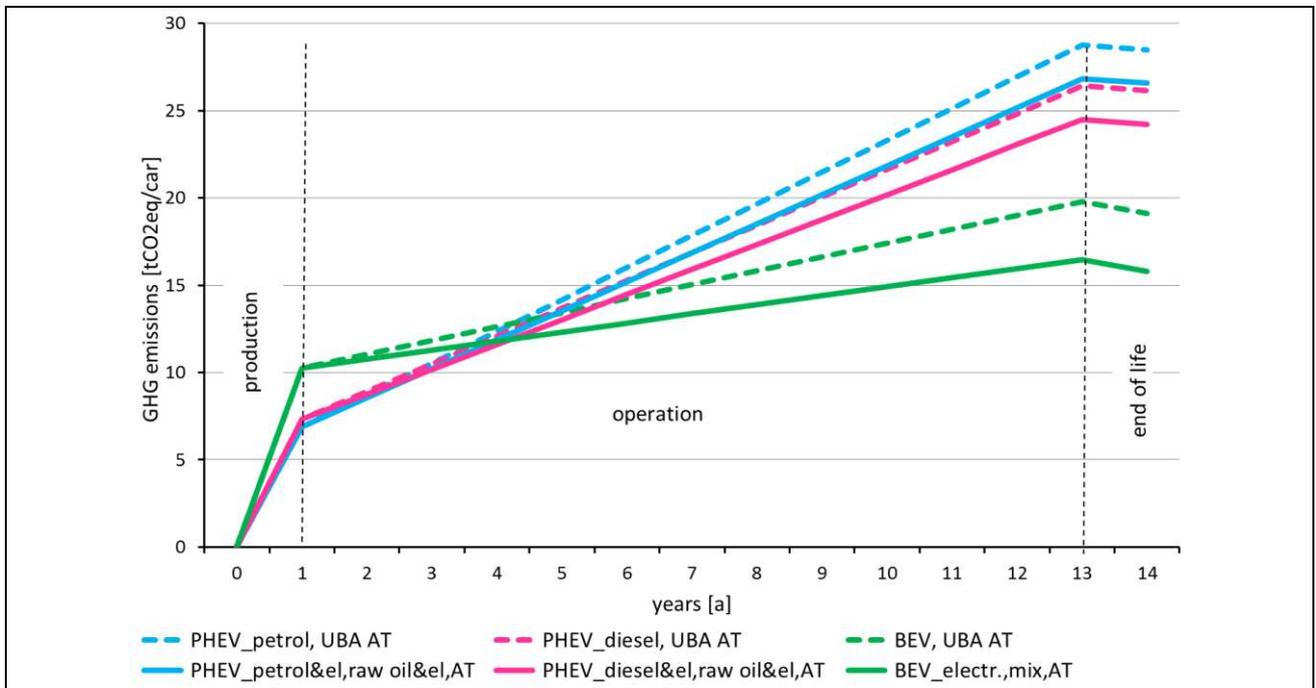


Abbildung 77: Vergleich der kumulierten Treibhausgasemissionen für den AT-Mix laut UBA und LCA-Tool

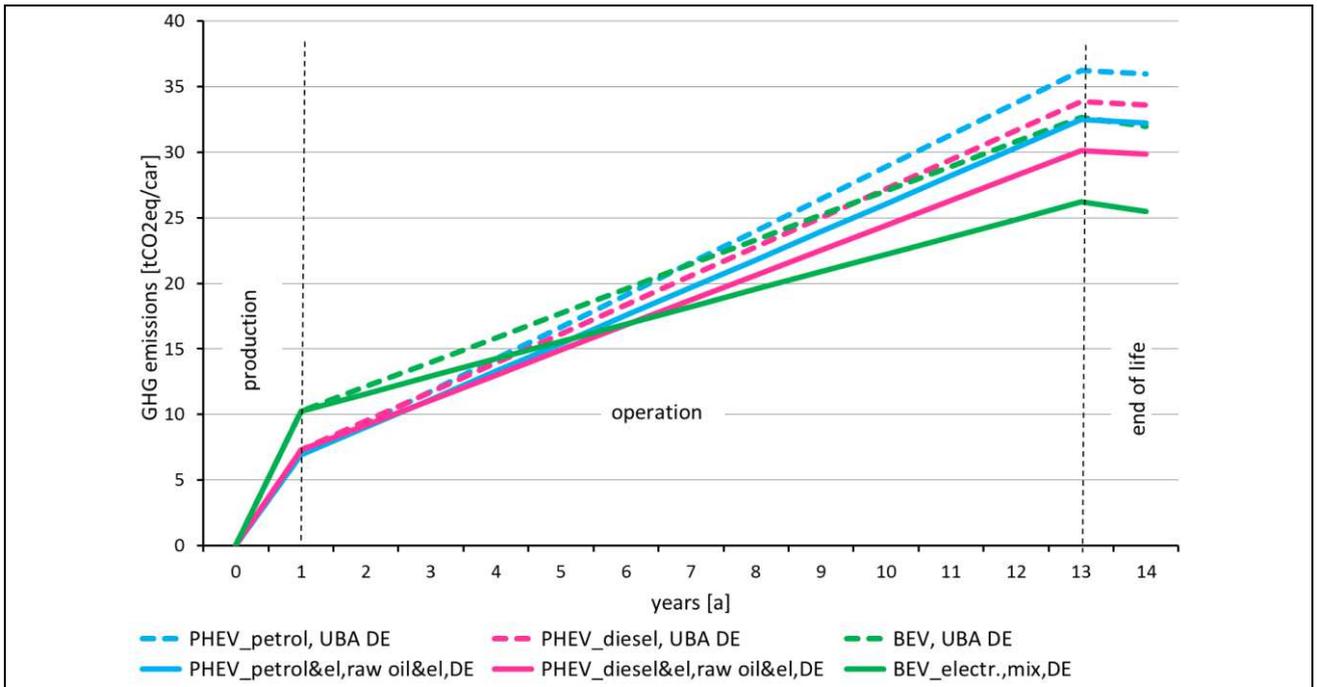


Abbildung 78: Vergleich der kumulierten Treibhausgasemissionen mittels DE-Mix laut UBA und LCA-Tool

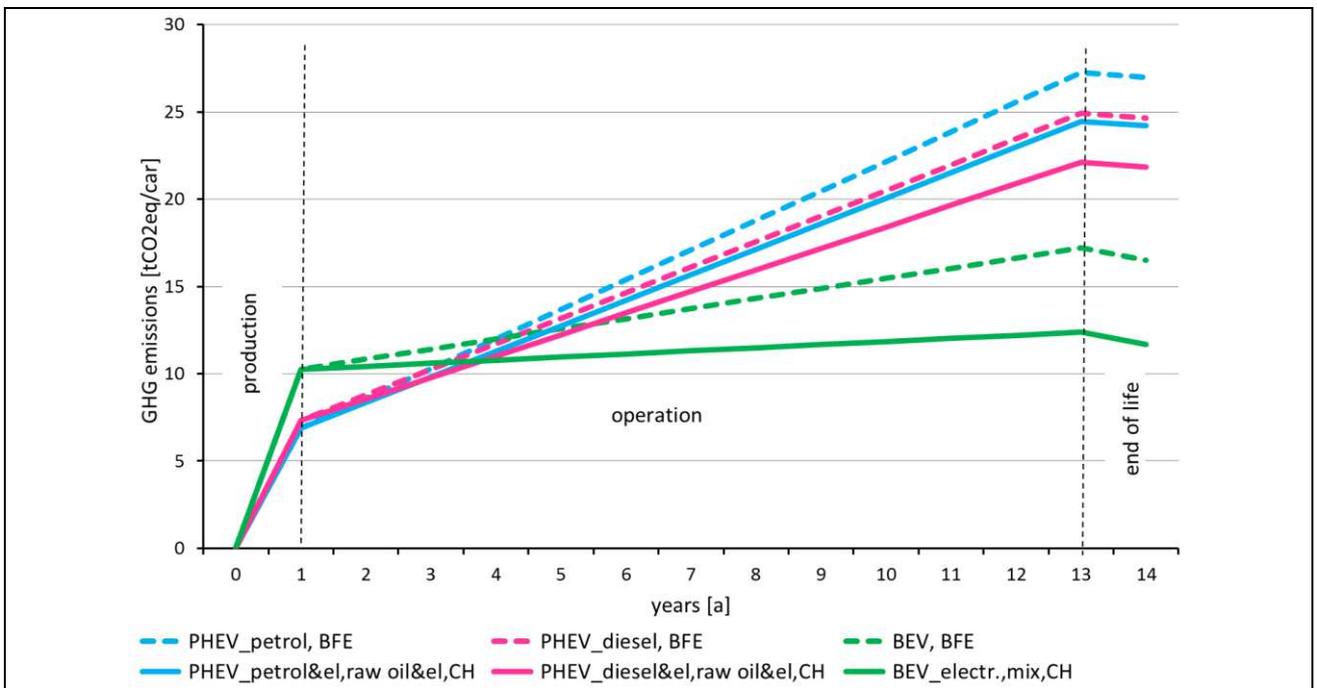


Abbildung 79: Vergleich der kumulierten Treibhausgasemissionen mittels CH-Mix laut BFE und LCA-Tool

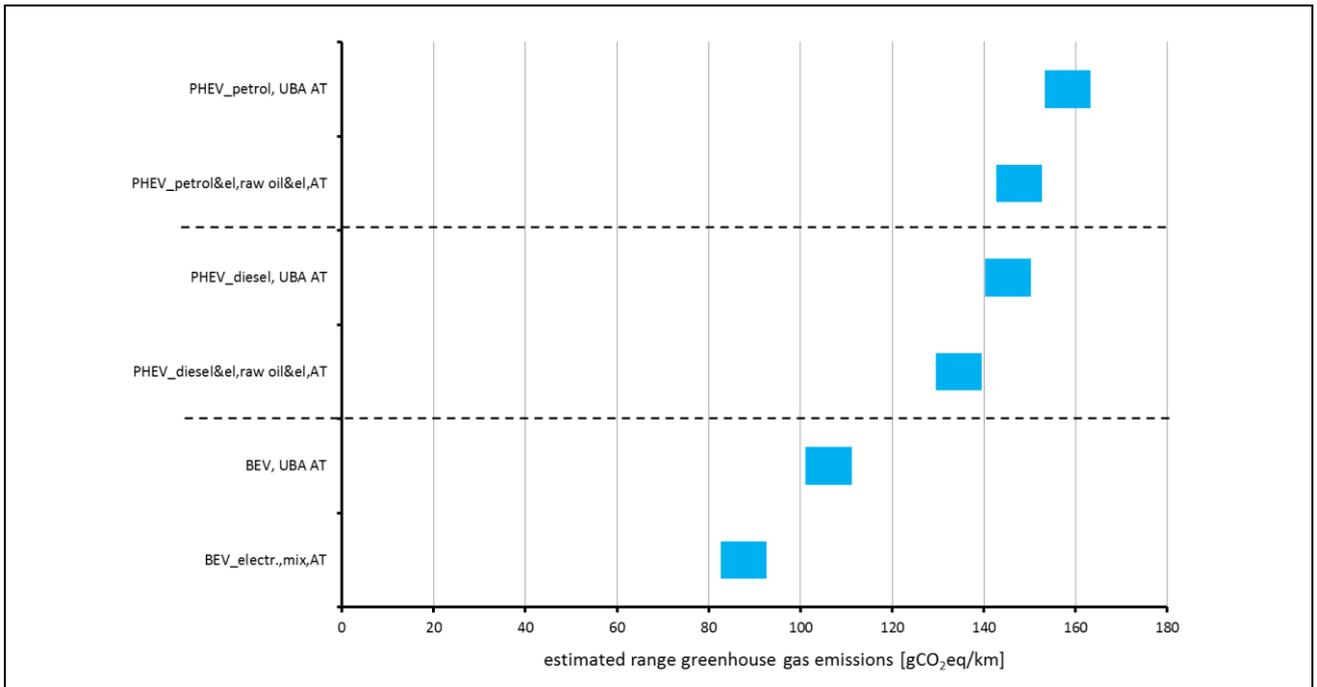


Abbildung 80: Vergleich der geschätzten Treibhausgasemissionen pro Kilometer anhand der unterschiedlichen Strommixe in AT

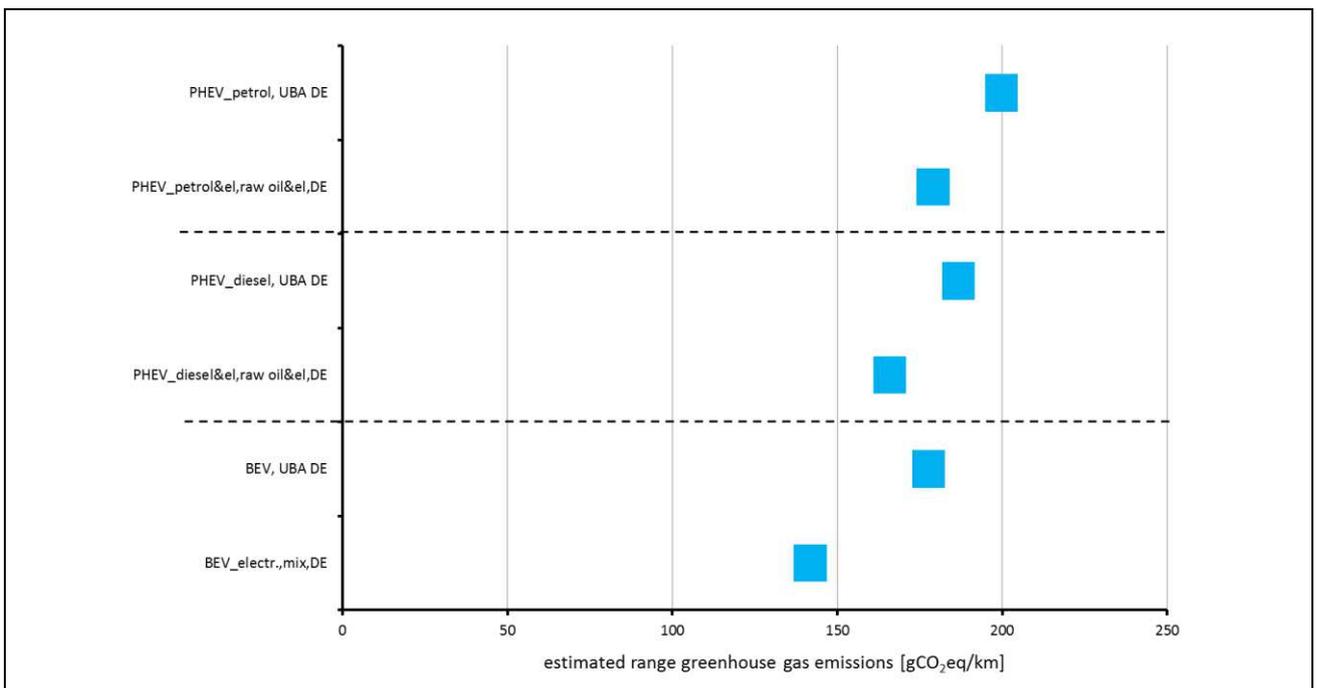


Abbildung 81: Vergleich der geschätzten Treibhausgasemissionen pro Kilometer anhand der unterschiedlichen Strommixe in DE

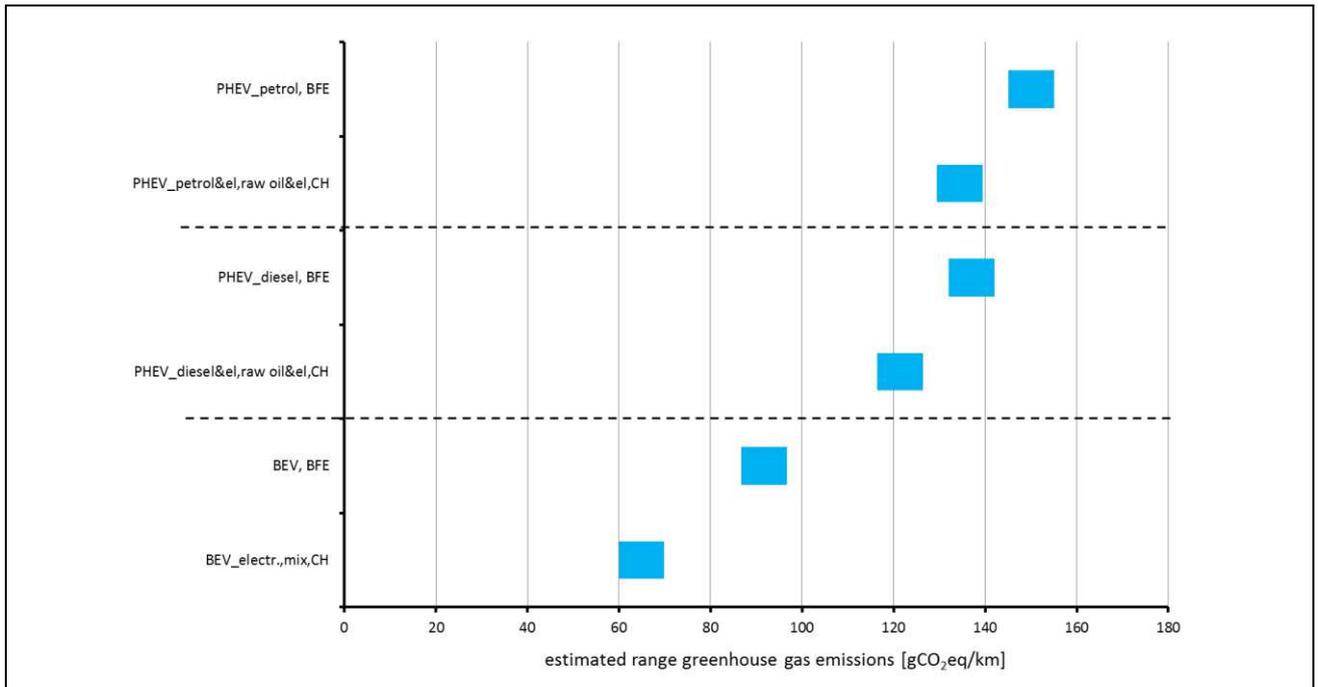


Abbildung 82: Vergleich der geschätzten Treibhausgasemissionen pro Kilometer anhand der unterschiedlichen Strommixe in CH

10.2.5 Referenzen

AT-Referenzen:

- Persönliche Kommunikation mit Umweltbundesamt
- On-line CO₂-Rechner des Umweltbundesamtes (<http://www5.umweltbundesamt.at/emas/co2mon/co2mon.htmlreports>)
- UBA Wien, Bericht: „Treibhausgasemissionen von Strom, Empfehlungen zur Öko-Bilanzierung“, Kranzl Sabine, 2018

DE-Referenzen:

- Bericht des UBA DE: „Emissionsbilanz erneuerbarer Energieträger, 23/2018“, M. Memmler, T. Lauf
- Bericht des UBA DE: „Entwicklung der spez. Kohlendioxidemissionen des DE-Strommixes“ 1990-2018, Petra Icha, 10/2019

- Persönliche Kommunikation mit Umweltbundesamt
- Persönliche Kommunikation mit ADAC

CH-Referenzen:

- treeze-Bericht 2014 „Umweltbilanz Strommix Schweiz 2014 v3.0“ (Messmer et al. 2014)
- Persönliche Kommunikation BFE und treeze