

Ökobilanz alternativer Antriebe

Fokus Elektrofahrzeuge



ÖKOBILANZ ALTERNATIVER ANTRIEBE

Fokus Elektrofahrzeuge

David Fritz
Holger Heinfellner
Günther Lichtblau
Werner Pölz
Barbara Schodl

REPORT
REP-0572

Wien 2016

Projektleitung

David Fritz, Werner Pölz

AutorInnen

David Fritz
Holger Heinfellner
Günther Lichtblau
Werner Pölz
Barbara Schodl

Lektorat

Sabine Enzinger

Satz/Layout

Elisabeth Riss

Umschlagphoto

© andrea lehmkuhl – Fotolia.com

Diese Studie wurde im Auftrag des Bundesministeriums für Land-und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft erstellt.

Abteilung I/5: Mobilität, Verkehr, Lärm

DI Robert Thaler

Gesamtkoordination:

Dr. Peter Wiederkehr

Stubenbastei 5

1010 Wien

Weitere Informationen zu Umweltbundesamt-Publikationen unter: <http://www.umweltbundesamt.at/>

Impressum

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

Das Umweltbundesamt druckt seine Publikationen auf klimafreundlichem Papier.

© Umweltbundesamt GmbH, Wien 2016

Alle Rechte vorbehalten

ISBN 978-3-99004-385-1

INHALT

	ABBILDUNGSVERZEICHNIS	5
	TABELLENVERZEICHNIS	6
	KURZZUSAMMENFASSUNG	7
	AUSFÜHRLICHE ZUSAMMENFASSUNG	8
1	AUSGANGSLAGE	15
1.1	Zielsetzung.....	16
1.2	Erweiterung bzw. Abgrenzung der bisherigen Analyse.....	16
1.3	Aufbau und Struktur des Berichtes	17
2	ÖKOBILANZIERUNG	18
2.1	Definition und Datenquellen	18
2.2	Lebenszyklus Pkw	18
2.3	Darstellung der Ergebnisse	19
2.4	Sensitivitätsanalyse	20
3	SYSTEMGRENZEN DER STUDIE	21
3.1	Direkte Emissionen und Energieeinsatz.....	21
3.2	Indirekte Emissionen und Energieaufwand für die Fahrzeugherstellung	22
3.3	Indirekte Emissionen und Energieaufwand für die Energiebereitstellung	26
3.4	Emissionen und Energieaufwand beim EoL-Prozess	27
4	MATERIAL- UND ENERGIEBILANZ	28
4.1	Materialeinsatz zur Fahrzeugherstellung	28
4.2	Emissionsfaktoren der Energiebereitstellung	31
5	BERECHNUNGSMETHODE UND SENSITIVITÄTSANALYSEN	33
5.1	Berechnungsmethode	33
5.2	Sensitivitätsanalyse	33
6	ERGEBNISSE DER ÖKOBILANZ	35
6.1	Emissionen	35
6.2	Kumulierter Energieaufwand	39
7	ERGEBNISSE DER SENSITIVITÄTSANALYSE	42
7.1	THG-Emissionen	44
7.2	NO _x -Emissionen	46
7.3	PM-Emissionen	47
7.4	Kumulierter Energieaufwand	48

8	WASSERSTOFF-BRENNSTOFFZELLENFAHRZEUG.....	50
9	SCHLUSSFOLGERUNGEN	51
10	LITERATURVERZEICHNIS.....	53
11	ABKÜRZUNGEN	55
	ANHANG – ERGEBNISTABELLE	56

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

<i>Abbildung 1:</i>	<i>Gesamte Treibhausgasemissionen in g CO₂-eq pro Fahrzeugkilometer verschiedener Pkw-Antriebsarten.....</i>	<i>9</i>
<i>Abbildung 2:</i>	<i>Kumulierte Energieaufwand KEA in Kilowattstunden pro Fahrzeugkilometer verschiedener Antriebsarten.....</i>	<i>11</i>
<i>Abbildung 3:</i>	<i>Bandbreite der gesamten CO₂-eq-Emissionen pro Fahrzeugkilometer bei Variation von unterschiedlichen Parametern.</i>	<i>12</i>
<i>Abbildung 4:</i>	<i>Lebenszyklus eines Pkw: Die türkisen Pfeile symbolisieren den Materialfluss, die schwarzen Pfeile den für jeden Lebenszyklusabschnitt benötigten Energieaufwand und die roten Pfeile die jeweiligen Emissionen.</i>	<i>19</i>
<i>Abbildung 5:</i>	<i>Darstellung der Massenanteile von Li-Ionen Akkumulatoren verschiedener Elektrofahrzeuge.....</i>	<i>23</i>
<i>Abbildung 6:</i>	<i>Gesamte Treibhausgasemissionen in CO₂-eq/Fkm verschiedener Pkw-Antriebsarten.....</i>	<i>36</i>
<i>Abbildung 7:</i>	<i>Gesamte Stickoxidemissionen in g/Fkm verschiedener Antriebsarten.....</i>	<i>37</i>
<i>Abbildung 8:</i>	<i>Gesamte Partikelemissionen in g/Fkm verschiedener Antriebsarten.....</i>	<i>39</i>
<i>Abbildung 9:</i>	<i>Kumulierte Energieaufwand (KEA) in Kilowattstunden pro Fkm verschiedener Antriebsarten.....</i>	<i>40</i>
<i>Abbildung 10:</i>	<i>Bandbreite der gesamten CO₂-eq-Emissionen bei Variation von unterschiedlichen Parametern.....</i>	<i>45</i>
<i>Abbildung 11:</i>	<i>Bandbreite der gesamten NO_x-Emissionen bei Variation von unterschiedlichen Parametern.</i>	<i>46</i>
<i>Abbildung 12:</i>	<i>Bandbreite der gesamten PM-Emissionen bei Variation von unterschiedlichen Parametern.</i>	<i>48</i>
<i>Abbildung 13:</i>	<i>Bandbreite des KEA bei Variation von unterschiedlichen Parametern.</i>	<i>49</i>

TABELLENVERZEICHNIS

<i>Tabelle 1: Massenanteil der Bestandteile einer Li-Ionen Akkumulator in % bzw. kg für die jeweiligen Elektrofahrzeuge).</i>	24
<i>Tabelle 2: Technische Daten der unterschiedlichen Akkus.</i>	25
<i>Tabelle 3: Materialeinsatz je Pkw in kg.</i>	29
<i>Tabelle 4: Darstellung der spezifischen Emissionsfaktoren und KEA je Energieträger.</i>	31
<i>Tabelle 5: Strompark Österreich: prozentuale Verteilung auf die einzelnen Energieträger für das Jahr 2012.</i>	31
<i>Tabelle 6: Prozentuale Verteilung der Energieträger des österreichischen UZ 46 Strommixes im Jahr 2012.</i>	32
<i>Tabelle 7: prozentuale Verteilung der Fahrsituation.</i>	35
<i>Tabelle 8: direkte Energieeinsätze in kWh/Fkm.</i>	40
<i>Tabelle 9: Gegenüberstellung der Emissionen und des kumulierten Energieaufwandes bei Verwendung von Primär- bzw. Sekundärrohstoffen zur Fahrzeugherstellung.</i>	42
<i>Tabelle 10: Emissionen und kumulierter Energieaufwand bei der Produktion eines Li-Ionen Akku.</i>	43
<i>Tabelle 11: Einteilung der Szenarien, die für sämtliche Emissionen bzw. den KEA gültig sind.</i>	44
<i>Tabelle 12: Gesamtergebnisse (Fahrzeugherstellung und Energiebereitstellung) für das H₂Brennstoffzellen-Fahrzeug.</i>	50
<i>Tabelle 13: Ergebnistabelle Gesamt- Auswertung nach Fahrzeugkilometern.</i>	56

KURZZUSAMMENFASSUNG

Die vorliegende Studie stellt einen Vergleich der Umwelteffekte von konventionellen Benzin-/Diesel-Pkw (Abgasnorm Euro 6) mit Hybrid- (HEV – Hybrid Electric Vehicle), Plug-In Hybrid- (PHEV – Plug-in Hybrid Electric Vehicle) und Batterie¹-Elektrofahrzeugen (BEV – Battery Electric Vehicle) dar.

Dieser Vergleich wird anhand einer Ökobilanz durchgeführt. Dabei werden die umweltrelevanten Parameter Treibhausgas- (THG) und Luftschadstoffemissionen (Stickoxidemissionen (NO_x) und Partikelemissionen (PM)) sowie der kumulierte Energieaufwand (KEA) über den ganzen Lebenszyklus eines Fahrzeugs betrachtet.

In allen betrachteten, umweltrelevanten Parametern schneiden Batterie-Elektrofahrzeuge signifikant besser ab. Dieser Vorteil kann bei einer Stromversorgung aus erneuerbaren Energieträgern noch deutlicher ausfallen.

- Im Vergleich zu konventionell betriebenen Diesel- bzw. Benzin-Fahrzeugen verursachen BEV weniger THG-Emissionen. Die Differenz liegt zwischen Faktor 4 bis 10 je Fahrzeugkilometer bzw. zwischen 75 und 90 %. Auch bei den NO_x- und PM-Emissionen ergeben sich zum Teil deutlich geringere Emissionen für BEV.
- Im Vergleich zu HEV verursachen BEV um 75 bis 90 % weniger THG-Emissionen und einen um 50 % bis 70 % geringeren KEA.
- BEV weisen außerdem um 65 bis 85 % weniger THG-Emissionen auf als PHEV.

Anhand einer Sensitivitätsanalyse wurden die Auswirkungen veränderter Rahmenbedingungen auf die Untersuchungsergebnisse dargestellt. Dabei zeigt sich, dass Fahrsituation, Akku-Lebensdauer und Fahrzeugherstellung die Ökobilanz wesentlich beeinflussen.

- Die geringsten umweltrelevanten Effekte verursachen BEV, die innerorts gefahren werden.
- Die Lebensdauer des Li-Ionen Akkumulators der BEV beeinflusst das Ergebnis maßgeblich.
- Die Verwendung von Sekundärmaterialien bei der Fahrzeugherstellung bringt erhebliche, umweltrelevante Vorteile.

¹ Streng genommen handelt es sich um eine wiederaufladbare Batterie (Akkumulator).

AUSFÜHRLICHE ZUSAMMENFASSUNG

Die vorliegende Studie stellt einen Vergleich der Umwelteffekte von konventionellen Benzin/Diesel-Pkw (Abgasnorm Euro 6) mit Hybrid- (HEV), Plug-In Hybrid- (PHEV) und Batterie-Elektrofahrzeugen (BEV) dar.

Dieser Vergleich wird anhand einer Ökobilanz durchgeführt. Dabei werden die umweltrelevanten Parameter Treibhausgas- (THG) und Luftschadstoffemissionen (Stickoxidemissionen (NO_x) und Partikelemissionen (PM)) sowie der kumulierte Energieaufwand (KEA) über den ganzen Lebenszyklus eines Fahrzeuges betrachtet.

Für die Berechnungen sind somit der Abbau der Rohstoffe, die Fahrzeugherstellung, Nutzung und Entsorgung bzw. die dabei benötigten Materialien und Energieaufwände berücksichtigt. Die Ergebnisse zeigen die direkten und indirekten Emissionen bzw. den Energieaufwand pro Fahrzeugkilometer.

Direkte Emissionen entstehen beim Betrieb des Fahrzeuges. Als „indirekt“ werden jene Emissionen bezeichnet, die bei der Fahrzeugherstellung, Energiebereitstellung, Akkumulatorproduktion und Entsorgung (End-of-Life) des Fahrzeuges anfallen. Analog wird zwischen direktem und indirektem Energieaufwand unterschieden.

In allen betrachteten umweltrelevanten Parametern schneiden Elektrofahrzeuge signifikant besser ab. Dieser Vorteil kann bei einer Stromversorgung aus erneuerbaren Energieträgern noch deutlicher ausfallen.

Ergebnisse der Ökobilanz

Die wichtigsten Ergebnisse zu den Treibhausgasemissionen:

THG Emissionen

- Elektrofahrzeuge haben um den Faktor 4 (durchschnittlicher österreichischer Strommix) bis maximal 10 (UZ 46 Strom²) weniger Emissionen als Benzin/Diesel-Pkw. BEV haben Emissionen von 20 bis 50 g CO₂-eq pro Fahrzeugkilometer, abhängig von der Stromherkunft und dem Fahrzeuggewicht.
- Benzin-Fahrzeuge verursachen die meisten THG-Emissionen von knapp über 200 g CO₂-eq pro Fahrzeugkilometer. Im Vergleich dazu produzieren Diesel-Fahrzeuge rund 5 % weniger Treibhausgasemissionen.
- Bei Benzin/Diesel-Pkw fallen die meisten Emissionen direkt im Fahrbetrieb an, weshalb die indirekten Emissionen nur eine untergeordnete Rolle spielen.
- HEV und PHEV haben auf Grund des zusätzlichen Elektromotors geringere THG Emissionen als Benzin/Diesel-Pkw.
- PHEV bilanzieren deutlich besser als HEV, emittieren aber rund doppelt so viele THG als rein elektrisch betriebene Fahrzeuge.

² In dieser Studie wird ausschließlich Strom aus erneuerbaren Energieträgern, der gemäß Umweltzeichen 46 zertifiziert ist, zur Bilanzierung herangezogen.

- Die Emissionen aus der Entsorgung der Fahrzeuge (EoL-Prozess) spielen für jede Antriebsart im Verhältnis zu den Emissionen aus den anderen Prozessen eine geringe Rolle³.

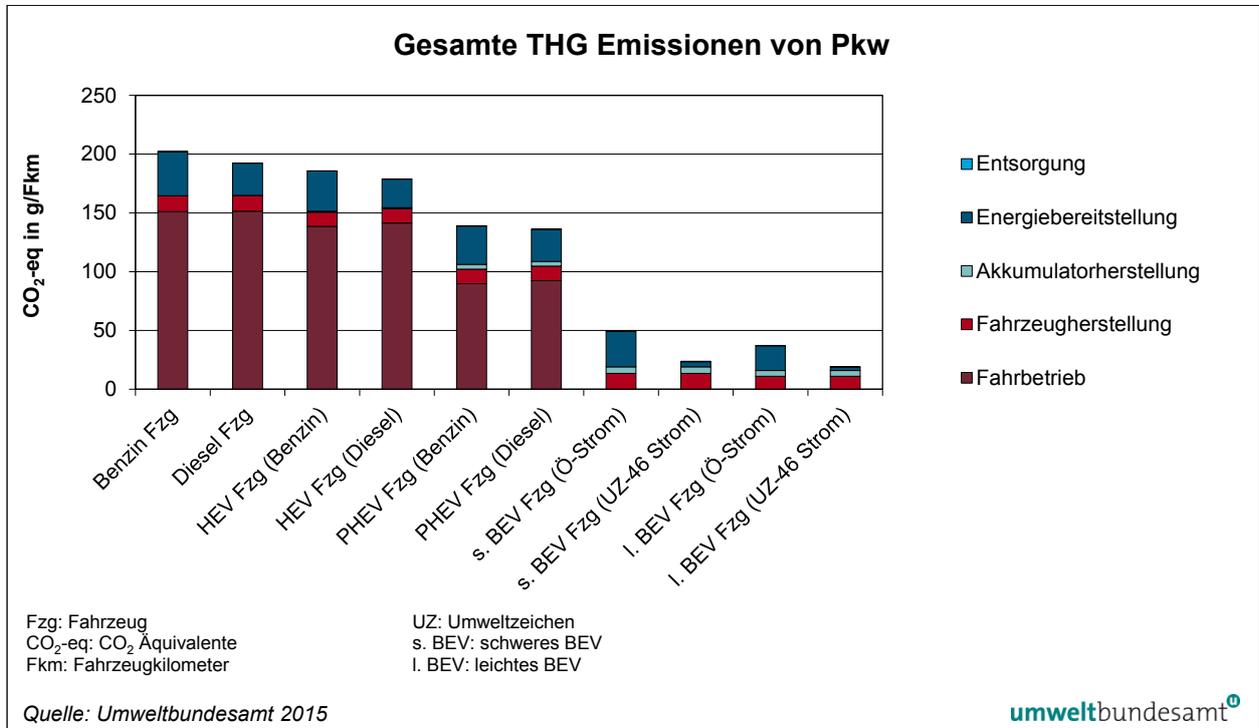


Abbildung 1: Gesamte Treibhausgasemissionen in g CO₂-eq pro Fahrzeugkilometer verschiedener Pkw-Antriebsarten.

Die wichtigsten Ergebnisse zu den Luftschadstoffemissionen:

NO_x-Emissionen:

- BEV produzieren zwischen 35 % bis 45 % weniger Stickoxid Emissionen als Benzinfahrzeuge, jedoch mit bis zu über 80 % deutlich geringere NO_x-Emissionen als Dieselfahrzeuge. Die Emissionen liegen für BEV je nach Strommix und Fahrzeuggewicht zwischen 0,074 und 0,11 g/Fkm.
- Die Energiebereitstellung verursacht die meisten Stickoxidemissionen Ausgenommen bei Diesel-Fahrzeugen. Bei diesen entstehen die Emissionen überwiegend während des Fahrbetriebs.
- Benzinfahrzeuge haben deutlich (Faktor 9) weniger direkte NO_x Emissionen als Dieselfahrzeuge (0,03 g/Fkm zu 0,27 g/Fkm). Hybridantriebe verstärken diesen Unterschied, sodass ein Diesel-PHEV rund 14-mal mehr direkte Emissionen produziert als ein Benzin-PHEV (0,19 g/Fkm zu 0,014 g/Fkm).
- Die NO_x-Emissionen aus der Fahrzeugentsorgung spielen im Vergleich zu den Emissionen aus anderen Prozessen lediglich eine untergeordnete Rolle.

NO_x Emissionen

³ Dieser Anteil an den Emissionen kann je nach angenommen Systemgrenzen stärker variieren und ist davon abhängig, ob der Material- und Energieaufwand für die Rohstoffaufbereitung zum EoL-Prozess oder zur Fahrzeugherstellung gezählt wird. In der vorliegenden Studie werden z. B. Emissionen und der Energieaufwand aus der Aufarbeitung und Bereitstellung von recyceltem Stahl nicht zum EoL-Prozess gezählt, sondern bei der Fahrzeugherstellung berücksichtigt.

PM-Emissionen

Partikelemissionen:

- Bei PM-Emissionen bilanzieren die betrachteten Antriebsarten mit rund 0,025 g/Fkm annähernd gleich.
- Rund 50 % der PM Emissionen resultieren aus der Fahrzeugherstellung. Die andere Hälfte stammt bei BEV aus der Akkumulatorherstellung und bei Benzin-/Diesel-Pkw bzw. HEV und PHEV aus der Energiebereitstellung.
- Da ein PHEV einen leistungsfähigen Akkumulator benötigt und zusätzlich fossil betrieben wird, produziert diese Antriebsart die meisten PM-Emissionen.
- Die PM-Emissionen aus der Fahrzeugentsorgung spielen zwar eine untergeordnete Rolle, sind aber im Vergleich zu THG- und NOx-Emissionen etwas höher.

Die wichtigsten Ergebnisse zum kumulierten Energieaufwand :

**kumulierter
Energieaufwand**

- Der KEA bei BEV ist um den Faktor 2,7 bis 3,5 geringer als bei fossil betriebenen Fahrzeugen bzw. HEV und PHEV (0,22 bis 0,33 kWh/Fkm zu 0,58 bis 0,77 kWh/Fkm).
- Der Energieaufwand beim Betrieb des Fahrzeugs (=spezifischer Verbrauch) hat bei allen Antriebsarten den größten Anteil am KEA.
- Die Bereitstellung von UZ 46 Strom benötigt den geringsten Energieaufwand. Auch Strom aus dem durchschnittlichen österreichischen Strommix wird mit geringerem Energieaufwand hergestellt als für die Herstellung fossiler Kraftstoffe benötigt wird.
- Diesel-Pkw bzw. Diesel-HEV und -PHEV haben einen höheren spezifischen Verbrauch als Benzin-Fahrzeuge.
- Der Energieaufwand für die Entsorgung der Fahrzeuge spielt, wie bei den anderen betrachteten Parameter, eine vergleichsweise geringe Rolle.

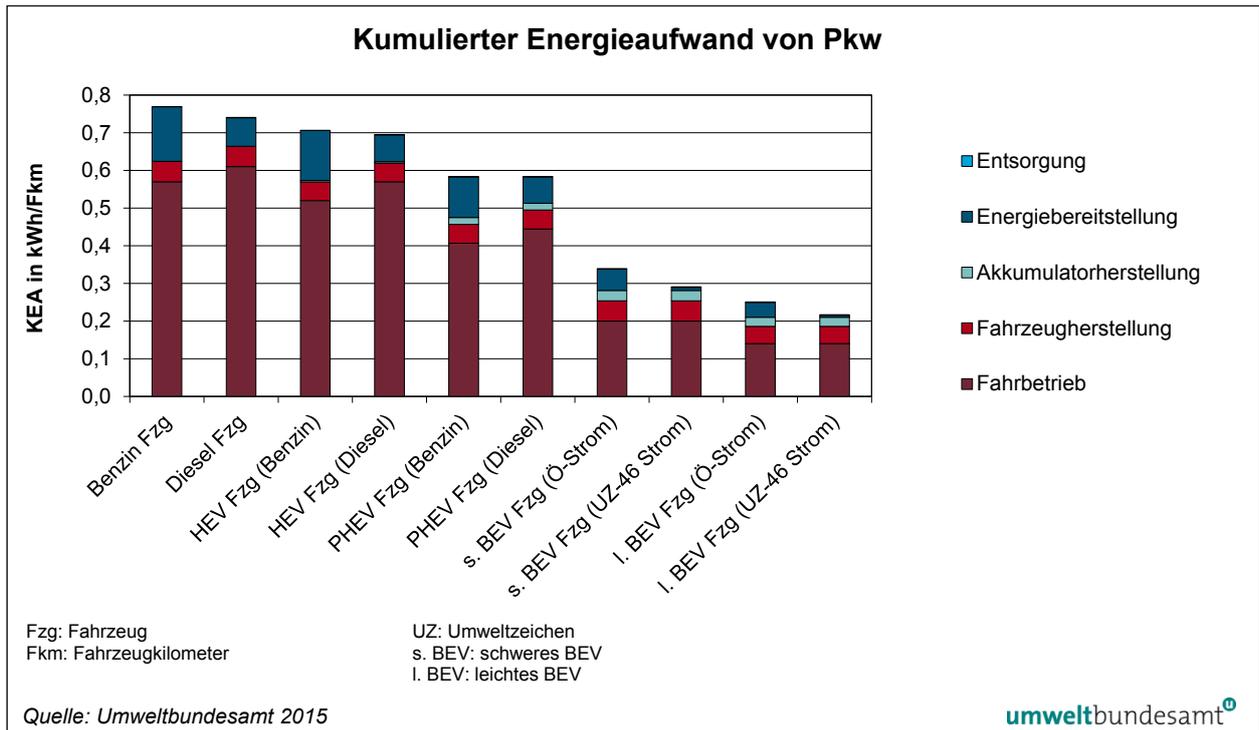


Abbildung 2: Kumulierte Energieaufwand KEA in Kilowattstunden pro Fahrzeugkilometer verschiedener Antriebsarten.

Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse

Bei einer Sensitivitätsanalyse in Rahmen einer Ökobilanz wird untersucht, wie sich eine Variation verschiedener Parameter auf das Gesamtergebnis auswirkt. Betrachtet wurden in dieser Studie speziell die umweltrelevanten Auswirkungen unterschiedlicher Fahrsituationen – innerorts, außerorts/Landstraße und auf Autobahnen. Zusätzlich dazu wurde untersucht wie sich eine Verdoppelung der Lebensdauer des Lithium-Ionen Akkumulators und die Herstellung der Fahrzeuge aus Primär- bzw. Sekundärrohstoffen auf die Ergebnisse auswirken. Die Ergebnisse aus der Variationen der Parameter lassen eine Darstellung des Bestcase (geringe Emissionen/Energieaufwand, lange Lebensdauer der Akkus, Fahrzeugproduktion aus Sekundärrohstoffen, UZ 46 Strom) bzw. Worstcase (hohe Emissionen/Energieaufwand, kurze Lebensdauer der Akkus, Fahrzeugproduktion aus Primärrohstoffen, durchschnittliche österreichische Strommix) zu.

Die wichtigsten Ergebnisse zu den Treibhausgasemissionen:

- THG-Emissionen von BEV liegen für Best- bzw. Worstcase zwischen 13 g und 71 g CO₂-eq/Fkm.
- Der Bestcase BEV verursacht um den Faktor 20 weniger THG-Emissionen als der Worstcase fossil (Benzin-/Diesel-Fahrzeug).
- Selbst im Worstcase (Fahrsituation: Autobahn) haben BEV deutlich geringere Emissionen als fossil betriebene Fahrzeuge bzw. HEV und PHEV im Bestcase.
- Die Fahrsituation hat einen größeren Einfluss auf die THG-Emissionen als die Fahrzeugherstellung oder die Lebensdauer der Akkumulatoren.

- BEV bzw. PHEV zeigen die geringsten Emissionen bei der Nutzung innerorts-, konventionelle Pkw im Außerortsverkehr.

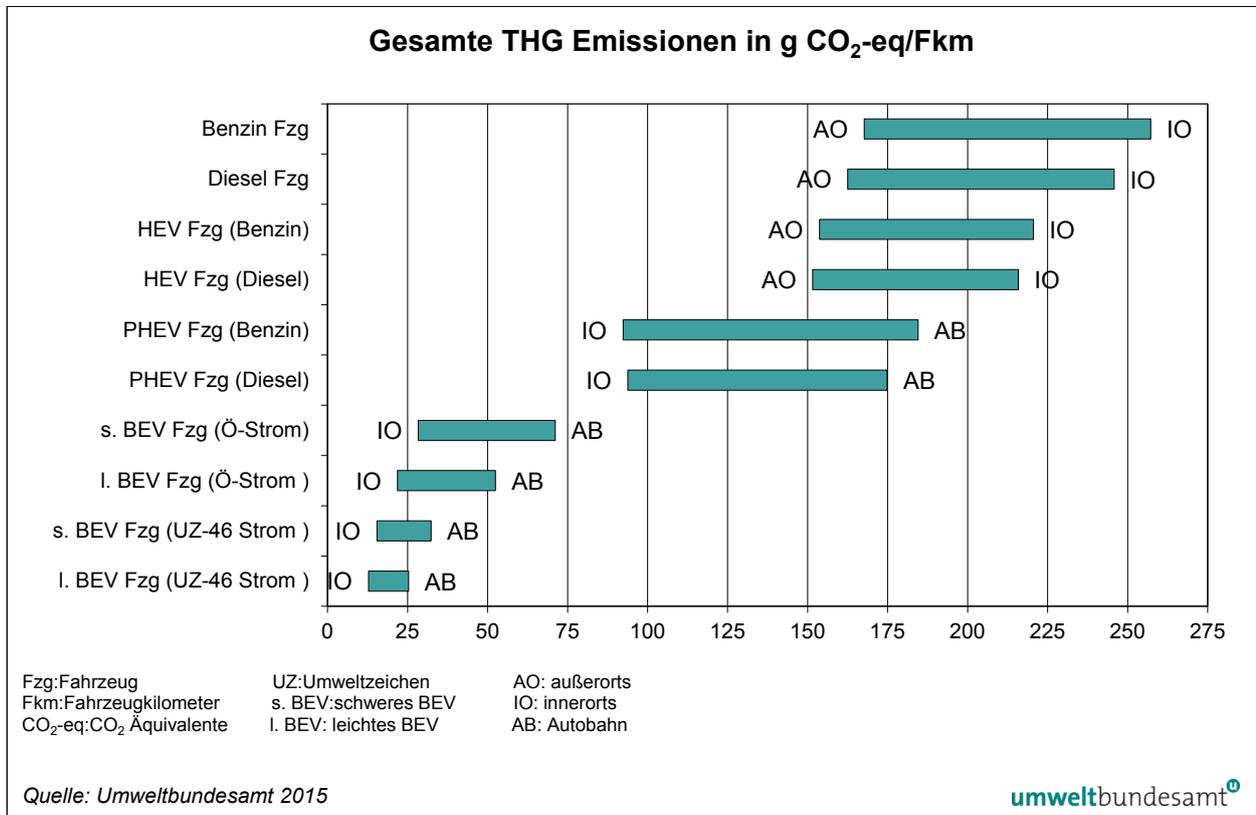


Abbildung 3: Bandbreite der gesamten CO₂-eq Emissionen pro Fahrzeugkilometer bei Variation von unterschiedlichen Parametern.

Die wichtigsten Ergebnisse zu den Luftschadstoffemissionen:

NO_x Emissionen:

- Die NO_x-Emissionen sind stark von Fahrsituation und Antriebsart abhängig.
- Innerorts betriebene BEV verursachen weniger NO_x-Emissionen als Benzinfahrzeuge bzw. Benzin-HEV und -PHEV auf Autobahnen.
- Die größte Bandbreite an NO_x-Emissionen weisen Diesel betriebene PHEV auf, wobei diese selbst im Bestcase mehr Emissionen aufweisen als BEV im Worstcase.
- Die mit Abstand meisten Emissionen verursachen Dieselfahrzeuge bzw. Diesel-HEV und -PHEV bei der Fahrsituation Autobahn. Die gleiche Fahrsituation führt bei Benzinfahrzeugen zu den geringsten Stickoxidemissionen.

Partikelemissionen:

- PM-Emissionen resultieren einerseits aus der Fahrzeugherstellung und andererseits bei Benzin/Diesel-Pkw bzw. HEV und PHEV aus der Energiebereitstellung und bei BEV aus der Akkumulatorherstellung.
- Bei PM-Emissionen hat die Fahrsituation weniger Einfluss.
- Im Bestcase haben BEV geringere Emissionen als Benzin/Diesel-Pkw bzw. HEV und PHEV. Analoges gilt für das Worstcase Szenario, auch hier schneiden BEV signifikant besser ab.

Die wichtigsten Ergebnisse zum kumulierten Energieaufwand:

- BEV benötigen, bezogen auf den gesamten Lebenszyklus, deutlich weniger Energieaufwand als Benzin/Diesel-Pkw bzw. HEV und PHEV.
- Innerorts benutzte, mit fossilen Kraftstoffen betriebene Fahrzeuge benötigen insgesamt den größten Energieaufwand.
- Der Energieaufwand im Worstcase für BEV ist mit dem Bestcase PHEV vergleichbar.
- Konventionell betriebene Fahrzeuge sind auf die Fahrsituation außerorts optimiert. Bei Betrieb innerorts benötigen diese einen wesentlich höheren direkten Energieeinsatz und somit auch einen höheren indirekten Energieaufwand für die Treibstoffbereitstellung.

Die Ergebnisse der Ökobilanz zeigen die umweltrelevanten Vorteile in Bezug auf Treibhausgas- und Luftschadstoffemissionen bzw. kumulierten Energieaufwand von Elektrofahrzeugen. Diese Vorteile kommen durch den Einsatz erneuerbarer Energieträger zur Stromerzeugung noch deutlicher zum Ausdruck. Durch die Sensitivitätsanalyse konnten die relevanten Beiträge ermittelt werden. So hat z. B. bei BEV die Lebensdauer der Batterie weniger Einfluss auf das Ergebnis als die Fahrsituation. Neue Entwicklungen und Innovationen bezüglich Energieinhalt, Lebensdauer und Reichweite von Akkumulatoren können die Ergebnisse positiv beeinflussen. Eine Erweiterung der ökologischen Indikatoren auf Emissionen in Wasser, Boden und Luft kann bei zukünftigen Berechnungen angedacht werden. Zusätzlich dazu sollte analysiert und erforscht werden, wie sich eine starke Marktdurchdringung von BEV auf die Strombereitstellung im europäischen Kontext auswirkt. Dabei ist die Frage, ob der zusätzliche Strombedarf mit erneuerbaren Energieträgern abgedeckt werden kann, von essentieller Bedeutung.

1 AUSGANGSLAGE

Der Straßenverkehr ist, bedingt durch die starke Zunahme an Fahrzeugen und Fahrleistung in den letzten Dekaden, derzeit einer der Hauptverursacher von Luftschadstoff- und Treibhausgasemissionen (THG-Emissionen). Der Motorisierungsgrad der österreichischen Bevölkerung ist von 6-7 Personenkraftwagen (Pkw) pro 1000 EinwohnerInnen (Hausberger 2008) im Jahr 1950 auf 546 Pkw (STATISTIK AUSTRIA 2014a) im Jahr 2013 gestiegen. Auch auf Grund von umweltpolitischen Zielvorgaben wie z. B. dem Kyoto Protokoll⁴, bei dem eine verbindliche Reduktion der THG-Emissionen für die Industriestaaten festgelegt wurde, wird in unterschiedlichen Studien der Frage nachgegangen, inwieweit der Sektor Verkehr eine Stellschraube für die Umsetzung dieser Ziele darstellt. Die Forcierung von Elektromobilität trägt wesentlich dazu bei, die THG-Emissionen im Verkehrssektor zu reduzieren. Dies wird in unterschiedlichen internationalen Studien (wie z. B. UMWELTBUNDESAMT 2014; HAWKINS et al. 2012; MESSAGIE et al. 2014) betont. Ähnliche Reduktionen sind auch bei Luftschadstoffen möglich, z. B. bei NO_x-Emissionen. Diese resultieren in erster Linie aus Dieselmotorkraftfahrzeugen (UMWELTBUNDESAMT 2014), die den größten Anteil (rund 56 %) an Pkw in Österreich darstellen (STATISTIK AUSTRIA 2014b). Auch hier kann Elektromobilität zu einer Verbesserung der Luftqualität beitragen.

Einleitung

In diesem Zusammenhang hat das Umweltbundesamt im Jahr 2014 eine Studie (UMWELTBUNDESAMT 2014) publiziert, wie unterschiedliche Fahrzeugtypen bei den Treibhausgas- bzw. Luftschadstoffemissionen bilanzieren und daraus abgeleitet, welche Technologie forciert werden soll, um die umweltpolitischen Zielvorgaben zur Luftqualität und zur THG-Emissionsreduktion zu erreichen. Dabei darf nicht außer Acht gelassen werden, dass der Verkehr zwar einen großen Teil der Emissionen verursacht, aber dass auch in anderen Sektoren wie z. B. Landwirtschaft und Industrie und aufgrund von Lebensstil (z. B. Ernährung) große Mengen an Emissionen anfallen. Das bedeutet unweigerlich, dass eine Umsetzung der Zielvorgaben (z. B. Kyoto-Protokoll) nur im Rahmen eines gesamtheitlichen Konzeptes angesehen werden kann, bei dem der Sektor Verkehr eine maßgebliche Rolle spielt.

Motivation

In Hinblick auf eine Realisierung der EU Ziele 2020 bzw. 2050 ist die Fokussierung auf den motorisierten Individualverkehr notwendig, wobei die Betrachtung der Umweltauswirkungen verschiedener Pkw-Antriebsarten nur im Rahmen einer Ökobilanz zu aussagekräftigen Ergebnissen führt.

Neben den oben erwähnten Studien gibt es eine Vielzahl an unterschiedlichen internationalen Arbeiten, die sich dem Thema Ökobilanz von Elektrofahrzeugen widmen. Dabei sind sehr divergierende Ergebnisse dokumentiert. Diese reichen von der Bestätigung des ökologischen Nutzens der Elektromobilität (z. B. ALTAUS & GAUCH 2010) bis hin zu Aussagen, dass E-Fahrzeuge in einigen umweltrelevanten Bereichen schlechter abschneiden als konventionelle Fahrzeuge (z. B. ALTAUS & BAUER 2011 oder MAUR et al. 2012).

⁴ Auf eine Darstellung der genauen Zielvorgaben etc. wird an dieser Stelle verzichtet und auf die Studie Ökobilanz alternativer Antriebe. Elektrofahrzeuge im Vergleich. (UMWELTBUNDESAMT 2014) verwiesen. Die Zielvorgaben haben sich seitdem nicht wesentlich verändert. Fakt ist, dass Österreich die nationalen THG-Emissionen drastisch reduzieren muss.

Dies ist einer der Gründe, warum diese Studie vom Umweltbundesamt im Auftrag des Bundesministeriums für ein lebenswertes Österreich speziell für österreichische Verhältnisse durchgeführt wurde.

1.1 Zielsetzung

umweltrelevante Kriterien

Ziel dieser Studie ist ein Vergleich der Umwelteffekte in Bezug auf Indikatoren/Kriterien von unterschiedlichen Fahrzeugtypen. Dabei werden insbesondere konventionelle Verbrennungskraftfahrzeuge (Benzin/Diesel) mit verschiedenen Arten von Elektroautos (reines Elektroauto, Hybrid und Plug-In Hybrid) verglichen.

Folgende umweltrelevante Kriterien werden betrachtet:

- Treibhausgasemissionen (THG)⁵,
- Stickoxidemissionen (NO_x),
- Partikelemissionen (PM),
- Kumulativer Energieaufwand (KEA).

Dieser Vergleich wird anhand einer Ökobilanz angestellt. Mit einer Ökobilanz können die Umweltaspekte eines Produktsystems über alle Phasen seines Lebenszyklus evaluiert werden. Dafür werden die oben beschriebenen Kriterien während der Produktion, der Nutzungsphase und der Entsorgung eines Produktes, in diesem Fall eines Fahrzeugs, bilanziert⁶.

1.2 Erweiterung bzw. Abgrenzung der bisherigen Analyse

Aufbauend auf der Studie Ökobilanz alternativer Antriebe. Elektrofahrzeuge im Vergleich. (UMWELTBUNDESAMT 2014) werden die oben beschriebenen Fahrzeugtypen untersucht. Zusätzlich wird u. a. die Entsorgung bzw. das Recycling betrachtet. Dazu ist es notwendig die Systemgrenzen der Ökobilanz zu adaptieren. Da die Systemgrenze ein wesentlicher Bestandteil einer Ökobilanz ist, wird im nachfolgenden Kapitel 3 näher darauf eingegangen.

Konventioneller vs. elektrischer Antrieb

An dieser Stelle folgt eine kurze Darstellung der Unterschiede zwischen den beiden Studien:

- In der vorliegenden Studie werden Elektrofahrzeuge im Vergleich zu konventionellen Fahrzeugen betrachtet:
 - Benzin-/Diesel-Fahrzeuge
 - BEV: rein mittels Akkumulator betriebenes Elektrofahrzeug

⁵ THG-Emissionen werden in sog. CO₂-eq Emissionen angegeben. Dabei werden die Treibhausgase Kohlendioxid CO₂, Methan CH₄, Distickstoffoxid N₂O, Hydrierte Fluorkohlenwasserstoffe HFC/HFCKW, Perfluorierte Fluorkohlenwasserstoffe PFC, Schwefelhexafluorid SF₆ und Stickstofftrifluorid NF₃ berücksichtigt und über einen definierten Umrechnungsfaktor für einen Zeithorizont von 100 Jahren auf CO₂-eq Emissionen umgerechnet.

⁶ Eine detailliertere Beschreibung einer Ökobilanz erfolgt im Kapitel 2.

- HEV: Hybrid-Elektrofahrzeug
- PHEV: Plug-In Hybrid-Elektrofahrzeug
- In der Studie Ökobilanz alternativer Antriebe. Elektrofahrzeuge im Vergleich. (UMWELTBUNDESAMT 2014) wurden darüber hinaus Erdgas-, Biodiesel- und Wasserstofffahrzeuge und zusätzlich Mopeds und Motorräder betrachtet.
- Ein wesentlicher Unterschied liegt in der durchschnittlichen Nutzungsdauer der Fahrzeuge. Bisher wurde von 10 Jahren Nutzungsdauer ausgegangen; dieser Zeitraum wurde nun auf 15 Jahre (das entspricht der durchschnittlichen Lebensdauer eines Pkw) ausgedehnt, um auch den sog. End-of-Life-Prozess (EoL-Prozess) der Fahrzeuge abzubilden. Unter dem EoL-Prozess wird in erster Linie das Verschrotten der Altfahrzeuge samt anschließender Entsorgung bzw. Recycling verstanden. Damit wird gewährleistet, dass der gesamte Lebenszyklus eines Fahrzeugs bilanziert wird.

Als Ergebnisse der Studie werden Treibhausgasemissionen (in Kohlenstoffdioxidäquivalent Emissionen, CO₂-eq), Luftschadstoffemissionen (in NO_x bzw. PM-Emissionen) sowie der kumulierte Energieaufwand (KEA) dargestellt, jeweils getrennt nach direkt im Fahrzeugbetrieb auftretenden Emissionen/benötigtem Energieeinsatz, den vorgelagerten Prozessemissionen/Energieeinsätzen, die bei der Fahrzeugherstellung und bei der Energiebereitstellung anfallen/benötigt werden und den Emissionen bzw. dem kumulierten Energieaufwand während des EoL-Prozesses.

1.3 Aufbau und Struktur des Berichtes

Der Bericht zur Studie gliedert sich in 7 Bereiche:

- Das erste Kapitel beinhaltet Einleitung, Motivation und Problemstellung.
- Im zweiten Kapitel „Ökobilanzierung“ wird kurz der theoretische Hintergrund einer Ökobilanz erläutert. Diese stellt ein Instrument für einen ökologischen Vergleich von unterschiedlichen Technologien dar.
- Im dritten Kapitel „Systemgrenzen der Studie“ werden die Systemgrenzen genau definiert und eine Erklärung für deren Wahl dargestellt.
- Als nächstes werden im Kapitel „Sachbilanz“ der Materialeinsatz je Pkw bzw. Akkumulator (Li-Ionen Akku) und die zur Berechnung herangezogenen Werte der einzelnen Fahrzeugkategorien sowie Strom- und Kraftstofftypen beschrieben.
- Im fünften Kapitel wird die Sensitivitätsanalyse inkl. Berechnungsmethode erläutert.
- Im Kapitel 6 „Ergebnisse“ sind die Resultate der Ökobilanz dargestellt. Die verschiedenen Fahrzeuge können hinsichtlich ihrer Umwelteffekte direkt verglichen werden.
- Kapitel 7 befasst sich mit den Ergebnissen der Sensitivitätsanalyse und den Parametern, die den größten Einfluss auf die umweltrelevanten Effekte der verschiedenen Antriebsarten haben.
- Im Anhang befindet sich die Ergebnistabelle.

2 ÖKOBILANZIERUNG

2.1 Definition und Datenquellen

Ökobilanz Eine Ökobilanz ermöglicht eine auf wissenschaftlicher Basis (Normen EN ISO 14040 ff) fundierte Erhebung der von Unternehmen, Produkten oder Dienstleistungen ausgehenden Umwelteinwirkungen und -auswirkungen. Dies ermöglicht eine anschließende Bewertung des Ressourcenverbrauchs, der Belastung und Schädigung der Umwelt durch Ressourcennutzung und durch Schadstoffemissionen in Boden, Wasser und Luft.

GEMIS Österreich Das Umweltbundesamt verwendet zur Erstellung dieser Bilanz das Softwareprogramm GEMIS (Globales-Emissions-Modell-Integrierter-Systeme). Damit werden sämtliche Auswirkungen der Fahrzeugherstellung und Energiebereitstellung berücksichtigt. Für die Ermittlung des tatsächlichen Energieverbrauchs und somit auch der direkten Emissionen eines Fahrzeugs wird das HBEFA 3.1 (Handbuch Emissionsfaktoren) bzw. NEMO (Nationales Emissionsmodell) verwendet.

Ist der Energieverbrauch für die Mobilität bekannt, kann mittels GEMIS der Lebenszyklus (siehe Abbildung 4) eines Fahrzeugs nachgebildet werden. Dabei werden, angefangen beim Rohstoffabbau, sämtliche Prozessschritte bis zur Wiederverwertung bzw. -verwendung der Rohstoffe berücksichtigt.

2.2 Lebenszyklus Pkw

Lebenszyklus Der Lebenszyklus⁷ eines Fahrzeugs, unabhängig von der Art der Traktion, gliedert sich, stark vereinfacht, in fünf Bereiche:

1. Rohstoffbereitstellung,
2. Verarbeitung zu Inputmaterialien,
3. Fahrzeugherstellung,
4. Einsatz („Autofahren“),
5. EoL-Prozess (Recycling und Entsorgung).

In jedem dieser Bereiche wird Energie benötigt und es fallen in jedem Bereich Emissionen an.

⁷ Etwaige notwendige Autoreparaturen sowie eine durch Unfälle oder unsachgemäße Handhabung der Pkw reduzierte Lebenserwartung werden in dieser Studie nicht berücksichtigt.

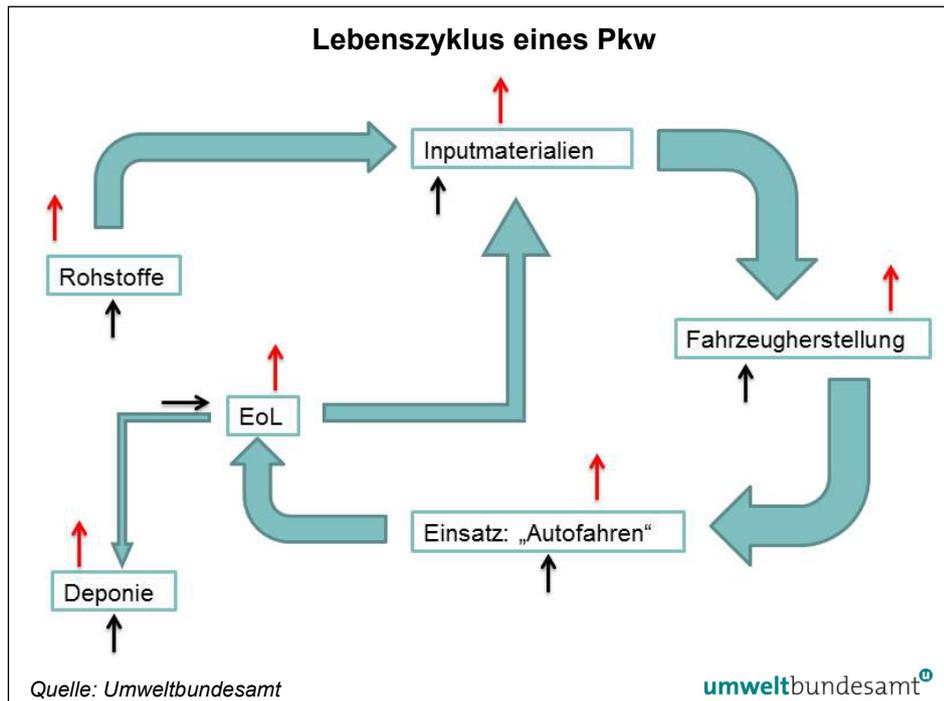


Abbildung 4:
Lebenszyklus eines Pkw: Die türkisen Pfeile symbolisieren den Materialfluss, die schwarzen Pfeile den für jeden Lebenszyklusabschnitt benötigten Energieaufwand und die roten Pfeile die jeweiligen Emissionen.

Am Beginn des Lebenszyklus steht die Rohstoffbereitstellung. Bei dieser werden sämtliche Rohstoffe, die zur Produktion eines Fahrzeugs benötigt werden, berücksichtigt. Dabei handelt es sich um den Abbau und die Bereitstellung der Ausgangsstoffe (Primär- und Sekundärrohstoffe) bzw. Rohmaterialien (z. B. Erze). Diese Rohstoffe bzw. Ausgangsmaterialien werden dann zu Inputmaterialien (z. B. Stahl) verarbeitet. Im nächsten Schritt wird aus den Inputstoffen das Fahrzeug zusammengebaut bzw. hergestellt um dann im nächsten Lebenszyklusabschnitt dem eigentlichen Nutzen zugeführt zu werden, dem Autofahren. Am Ende des Lebenszyklus wird das Fahrzeug recycelt und wiederverwendet oder -verwertet; nicht recycelbare Ware z. B. auf einer Deponie entsorgt. Dieser Vorgang wird End-of-Life genannt.

GEMIS-Österreich berücksichtigt die Fahrzeugherstellung (inklusive Li-Ionen Akkumulator), die Energieumwandlung für den Betrieb der Fahrzeuge – von Rohöl zu Diesel/Benzin oder „Stromgeneration“ mittels Wasserkraft – und den EoL-Prozess.

Die Emissionen aus dem Betrieb der Pkw werden der Software NEMO/HBEFA 3.1 entnommen.

2.3 Darstellung der Ergebnisse

Grundsätzlich ist ein Technologievergleich im Rahmen einer Ökobilanz nur dann sinnvoll, wenn eine funktionelle Einheit definiert wurde. So ist es z. B. nicht zulässig zwei unterschiedliche Akkumulatoren zu vergleichen. Dies ist nur dann aussagekräftig, wenn eine funktionelle Einheit/Bezugsgröße definiert wurde, in diesem Beispiel wäre das z. B. kWh/kg.

Bezugsgröße:
Fahrzeugkilometer

In dieser Studie werden somit die Ergebnisse nicht in absoluten Zahlen angegeben, sondern in der Bezugsgröße Fahrzeugkilometer (Fkm), da ein einfacher Vergleich von unterschiedlichen Fahrzeugen keine zulässigen Schlussfolgerungen zulässt (unterschiedliches Gewicht, Treibstoffverbrauch etc.).

2.4 Sensitivitätsanalyse

Die Sensitivitätsanalyse stellt einen wichtigen Teil jeder Ökobilanz dar. Ziel ist, die Ergebnisse einer Plausibilitätsprüfung zu unterziehen und anteilmäßig die Beiträge der unterschiedlichen Lebenszyklen (siehe Abbildung 4) zum Gesamtergebnis dargestellt. Dadurch können jene Stellschrauben gefunden werden, die bei einer Änderung große Auswirkungen auf das Gesamtergebnis erzielen.

Falls sich z. B. bei einer Sensitivitätsanalyse herausstellt, dass der Abbau bestimmter Rohstoffe große Mengen an THG-Emissionen bedingt, kann bei einer Änderung dieser Rohstoffe (andere Materialien oder Sekundärmaterialien) ein deutlich besseres Ergebnis erzielt werden.

3 SYSTEMGRENZEN DER STUDIE

Die Definition von Systemgrenzen ist ein wichtiger Bestandteil jeder Ökobilanz. Für die Vergleichbarkeit ist es unerlässlich, die gleiche Systemgrenze für alle Technologien und Antriebsarten zu wählen. So wäre ein Vergleich nur der direkten Emissionen zwischen konventionellen und Elektrofahrzeugen nicht zulässig, da die Systemgrenzen zumindest bis zur Energiebereitstellung ausgedehnt werden müssen.

Die vorliegende Studie stellt keine vollständige Ökobilanz dar, da sich die Berechnungen auf THG-, NO_x-, PM-Emissionen und den KEA beschränken. Diese Parameter sind aber wesentlich für die Ermittlung der Umweltperformance der einzelnen Pkw:

- In Anbetracht des globalen Klimawandels ist eine Fokussierung auf THG-Emissionen unerlässlich.
- NO_x- und PM-Emissionen sind auf Grund ihrer sehr schädigenden Wirkung auf Menschen von besonderem Interesse. Eine aktuelle Studie der WHO (WHO 2015) weist darauf hin, dass jährlich und global rund 7 Millionen vorzeitige Todesfälle durch Luftverschmutzung zurückzuführen sind, wobei der motorisierte Straßenverkehr als einer der Hauptquellen für die Emissionen genannt wird.
- Über den KEA kann auf viele Umweltauswirkungen geschlossen werden. Je größer der KEA pro funktioneller Einheit, desto negativer die Auswirkungen auf die Umweltperformance.⁸

Parameter für die Umweltperformance

3.1 Direkte Emissionen und Energieeinsatz

Der direkte Energieeinsatz umfasst den zum Betrieb der Pkw benötigten Treibstoff (Benzin/Diesel bzw. Strom), basiert auf Daten aus NEMO/HBEFA 3.1 und stellt einen repräsentativen österreichischen Durchschnitt für die jeweilige Fahrzeugkategorie dar.

Auch die direkten Emissionen (THG, NO_x und PM) sind je Fahrzeugtyp den Datenbanken NEMO/HBEFA 3.1 entnommen und resultieren aus den durch den Betrieb entstehenden Emissionen (Treibstoffverbrennung). Da bei BEV im Betrieb keine Emissionen anfallen, weisen lediglich die konventionellen Benzin/Diesel-Fahrzeuge und die Hybrid-Fahrzeuge (HEV und PHEV) direkte Emissionen auf.

Die Systemgrenze für dieses Ergebnis beschränkt sich ausschließlich auf die durch die Verbrennung im Tank entstehenden Emissionen bzw. auf die zur Bewegung benötigte Energie.

Für eine erste Berechnung wurde der durchschnittliche Energieeinsatz je Pkw aus den Datenbanken NEMO/HBEFA 3.1 herangezogen. Die direkten Emissionen (im speziellen CO₂) sind eine Folge des direkten Energieeinsatzes. Da aber in Abhängigkeit von Fahrstil, Fahrsituation, Fahrbahnbelag, Witterungsverhält-

unterschiedliche Fahrsituation

⁸ Diese Aussage stellt eine starke Vereinfachung dar, da die Art der eingesetzten Energie zu berücksichtigen ist.

nissen, Jahreszeit etc. der Energieeinsatz stark variieren kann, wird in einer Sensitivitätsanalyse dargestellt, wie sich die direkten Emissionen bei unterschiedlichen Energieeinsätzen verhalten. Damit soll eine treibstoffsparende und unökonomische Fahrweise simuliert werden. Dabei werden folgende Fahrsituationen betrachtet:

- Innerorts,
- außerorts/Landstraße und Schnellstraßen ohne Autobahnen,
- Autobahn.

Die Auswirkung von unterschiedlichen direkten Energieeinsätzen wurde in der Studie Ökobilanz alternativer Antriebe. Elektrofahrzeuge im Vergleich. (UMWELTBUNDESAMT 2014) nicht untersucht.

***lokale Konzentration
von Luft-
schadstoffen***

Die gesundheitsschädigende Wirkung von direkten Emissionen von Luftschadstoffen im Fahrbetrieb ist abhängig von den lokalen bzw. regionalen Gegebenheiten. Besonders problematisch ist das Zusammentreffen von großem Verkehrsaufkommen samt Emissionen und hoher Bevölkerungsdichte, etwa in einer Stadt. Die Ökobilanz zeigt die insgesamt verursachten Emissionen auf, für die Beurteilung der negativen gesundheitlichen Folgewirkungen ist eine Analyse der räumlichen Verteilung der Emissionen erforderlich.

3.2 Indirekte Emissionen und Energieaufwand für die Fahrzeugherstellung

***örtlich getrennte
diffuse Quellen***

Im Gegensatz zu den direkten stammen die indirekten Emissionen v. a. aus der Fahrzeug- und Akkumulatorherstellung sowie aus der Energiebereitstellung und somit aus einer Vielzahl von unterschiedlichen und örtlich getrennten (diffusen) Quellen. Zusätzlich dazu fallen indirekte Emissionen in der Regel nicht in Gebieten mit hoher Bevölkerungsdichte an.

***upstream
Emissionen***

Für die Fahrzeugherstellung wird die Systemgrenze über sämtliche prozessbedingte Emissionen und Energieeinsätze, vom Abbau der benötigten Rohstoffe, der Weiterverarbeitung zu Inputmaterialien bis hin zur tatsächlichen Fahrzeugherstellung berücksichtigt. Dazu zählen auch die vorgelagerten (upstream) Emissionen die z. B. beim Bau von Fabriken oder Kraftwerken entstehen. Außerdem werden sämtliche transportbezogenen Emissionen wie z. B. Schifftransport von Rohöl, der Transport der Materialien zwischen den einzelnen Produktionsstätten oder auch etwaige Gas-Pipeline Leckagen und der damit verbundene Gasaustritt berücksichtigt.

Recycling

Bei der Sensitivitätsanalyse wird in diesem Bereich untersucht, wie sich das Ergebnis verändert, wenn Primär- oder Sekundärrohstoffe (aus recyceltem Material) für die Fahrzeugherstellung herangezogen werden. Dieser Vergleich zwischen den unterschiedlichen Inputmaterialien ist gegenüber der Studie Ökobilanz alternativer Antriebe. Elektrofahrzeuge im Vergleich. (UMWELTBUNDESAMT 2014) neu.

3.2.1 Traktionsspeicher: Li-Ionen Akkumulator

In dieser Studie werden im Gegensatz zur Studie Ökobilanz alternativer Antriebe. Elektrofahrzeuge im Vergleich. (UMWELTBUNDESAMT 2014) lediglich Li-Ionen Akkumulatoren betrachtet. Unterschiedliche Studien (z. B. THIELMANN et al. 2012) gehen davon aus, dass sich in naher Zukunft diese Art von Akkumulator im Bereich der Elektromobilität durchsetzen wird. Andere Technologien wie z. B. Natrium-Nickelchlorid-Akkumulatoren (sogenannte ZEBRA) werden daher nicht berücksichtigt.

Als Ionenmaterial kommen unterschiedliche Elemente in Frage, wie z. B. Kobalt, Mangan, Titan etc. Für diese Studie wird die Berechnung nur für Mangan(III)oxid (Mn_2O_3) durchgeführt. Nachfolgende Abbildung 5 und Tabelle 1 listen die Akkuzusammensetzung der einzelnen Elektrofahrzeuge auf. Dabei wird zwischen batterieelektrischen (BEV), Plug-In Hybrid (PHEV) und Hybrid Fahrzeugen (HEV) unterschieden.

**Ionenmaterial
Mangan(III)-oxid**

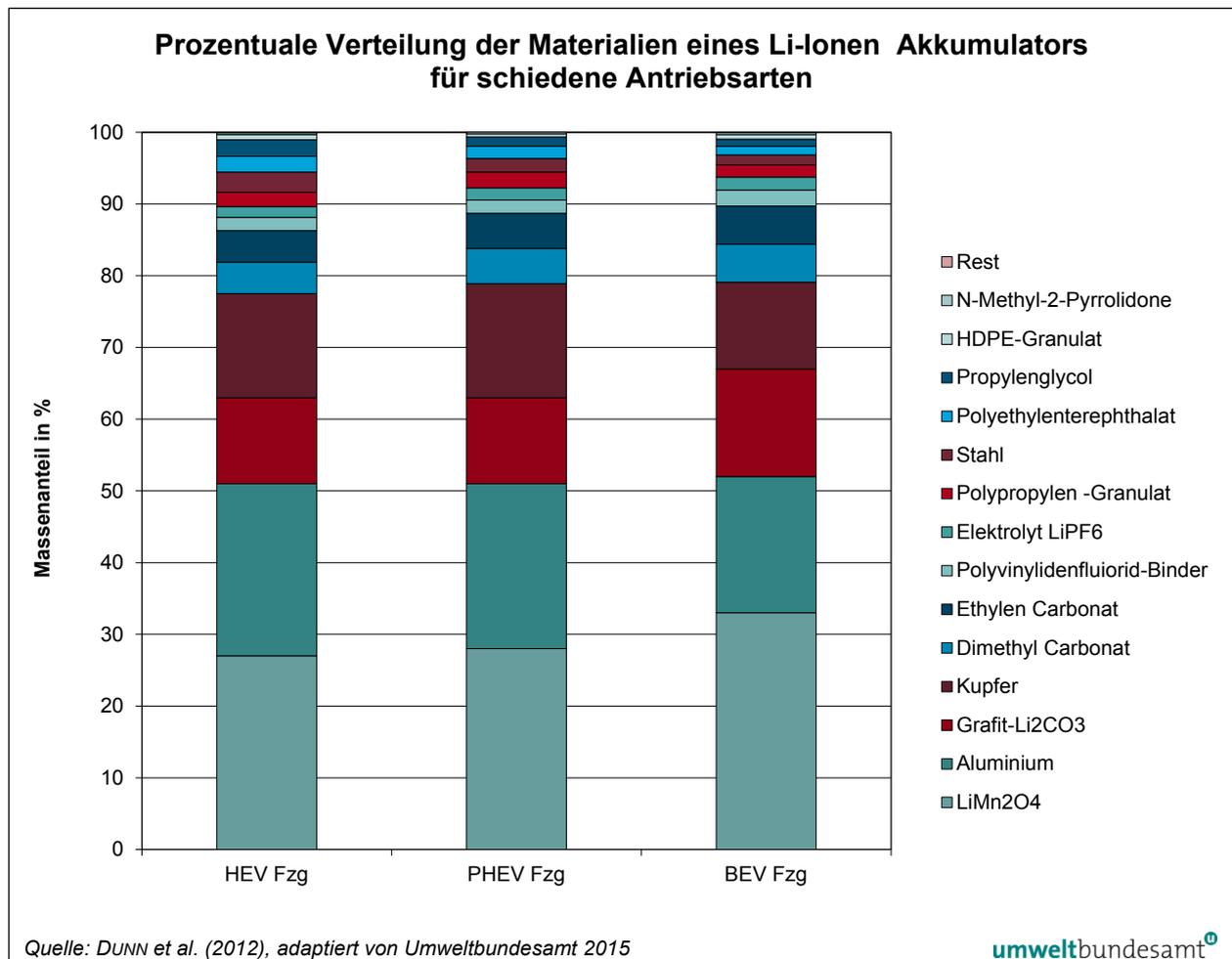


Abbildung 5: Darstellung der Massenanteile von Li-Ionen Akkumulatoren verschiedener Elektrofahrzeuge (adaptiert nach DUNN et al. 2012).

Tabelle 1: Massenanteil der Bestandteile einer Li-Ionen Akkumulator in % bzw. kg für die jeweiligen Elektrofahrzeuge (adaptiert nach DUNN et al. 2012).

Material	HEV Fzg		PHEV Fzg		BEV Fzg (leicht)		BEV Fzg (schwer)	
	%	kg	%	kg	%	kg	%	kg
LiMn ₂ O ₄	27,00	6,80	28,00	33,60	33,00	57,80	33,00	66,00
Aluminium	24,00	6,00	23,00	27,60	19,00	33,30	19,00	38,00
Grafit-Li ₂ CO ₃	12,00	3,00	12,00	14,40	15,00	26,30	15,00	30,00
Kupfer	14,50	3,60	15,90	19,10	12,10	21,20	12,10	24,20
Dimethyl Carbonat	4,40	1,10	4,90	5,90	5,30	9,30	5,30	10,60
Ethylen Carbonat	4,40	1,10	4,90	5,90	5,30	9,30	5,30	10,60
Polyvinylidenfluorid-Binder	1,85	0,50	1,85	2,20	2,25	3,90	2,25	4,50
Elektrolyt LiPF ₆	1,50	0,40	1,70	2,00	1,80	3,20	1,80	3,60
Polypropylen -Granulat	2,00	0,50	2,20	2,60	1,70	3,00	1,70	3,40
Stahl	2,80	0,70	1,90	2,30	1,40	2,50	1,40	2,80
Polyethylenterephthalat	2,20	0,60	1,70	2,00	1,20	2,10	1,20	2,40
Propylenglycol	2,30	0,60	1,30	1,60	1,00	1,80	1,00	2,00
HDPE-Granulat	0,69	0,20	0,40	0,50	0,63	1,10	0,63	1,30
N-Methyl-2-Pyrrolidone	0,25	0,10	0,25	0,30	0,25	0,40	0,25	0,50
Rest	0,11	0,00	0,00	0,00	0,07	0,10	0,07	0,10
Summe	100,00	25,00	100	120,00	100,00	175,00	100,00	200,00

Grundsätzlich bringen verschiedene Rohstoffe sehr unterschiedliche ökologische Rucksäcke mit sich. In Tabelle 1 ist ersichtlich, dass die Metalle (Aluminium, Kupfer, Stahl) einen Anteil von rund 33 % am Akkugewicht haben. Das Ionenmaterial (in diesem Beispiel Mn_2O_3) ist ein Teil des Kathodenmaterials Lithium-Manganoxid ($LiMn_2O_4$), das maximal 33 % des Gesamtgewichtes eines Akkumulators ausmacht. Wird das Atomgewicht laut Periodensystem berücksichtigt, trägt Mangan mit rund 60 % zum Gewicht des Kathodenmaterials bei. Daraus folgt, dass auf das Element Mangan maximal 20 % des gesamten Akkumulators entfallen. Eine ähnliche prozentuelle Verteilung ergibt sich auch für andere Ionenmaterialien.

Nach DUNN et al. 2012 konnte für jedes in Tabelle 1 aufgelistete Material der Energieaufwand entnommen und mit GEMIS der Akkumulator abgebildet werden. Dabei wird für alle Rohstoffe der gesamte Lebenszyklus berücksichtigt.

Ein besonderes Augenmerk wird auf den EoL-Prozess des Akkumulators gelegt. Dazu gibt es in der Literatur relativ wenige Studien, auch aufgrund des Fehlens von Daten von großindustriellen Entsorgungsstationen. Da diese Technologie relativ jung ist, gibt es derzeit nur wenige Recyclinganlagen, die sich explizit mit der Wiederverwertung von Li-Ionen Akkumulatoren aus BEV beschäftigen. Dies wird sich in Zukunft, bei einer starken Marktdurchdringung ändern. In dieser Studie wird anhand der verfügbaren Daten in erster Linie eine Abschätzung möglicher, umweltrelevanter Auswirkungen durchgeführt. Zudem wird ein mögliches Recyclingkonzept mittels GEMIS simuliert und die Emissionen bzw. der Energieaufwand berechnet.

Nachfolgende Tabelle 2 listet die technischen Daten der einzelnen Akkus auf.

	HEV	PHEV	BEV leicht	BEV schwer
Energieinhalt [kWh]	2	12	24,5	28
Reichweite [km]	-	60–70	140	160

End-of-Life-Prozess des Akkus

*Tabelle 2:
Technische Daten der
unterschiedlichen Akkus
(adaptiert nach DUNN
et al. 2012).*

Der Li-Ionen Akkumulator wird in den Ergebnissen ausgewiesen.

Anmerkung: In der vorliegenden Studie wird als Ionenmaterial nur Mangan (THG-Emissionen 2,6 kg/kg) detailliert bilanziert. Die Ergebnisse würden sich bei Verwendung anderer Materialien wie z. B. Kobalt (THG-Emissionen 8,3 kg/kg) oder Titan (THG-Emissionen 4,1 -5,0 kg/kg)⁹ verändern. Eine Überschlagsrechnung zeigt, dass sich die gesamten THG-Emissionen für die Akkuherstellung bei Verwendung von Kobalt um max. 5 % erhöhen würden.

Für das Gesamtergebnis ist der Einfluss des Ionenmaterials daher von untergeordneter Bedeutung.

⁹ THG-Emissionen aus Datenbank Ecoinvent 3.0

3.3 Indirekte Emissionen und Energieaufwand für die Energiebereitstellung

Systemgrenzen In dieser Kategorie sind ähnliche Systemgrenzen wie bei der Fahrzeugherstellung angesetzt. Es werden wiederum sämtliche herstellungsbedingte Emissionen betrachtet.

Da für jeden Pkw-Typ eine unterschiedliche Energiebereitstellung erforderlich ist, folgt eine kurze Gegenüberstellung der wesentlichen Unterschiede:

- **Benzin-/Diesel-Pkw**

Konventionelle Benzin-/Diesel-Fahrzeuge (Verbrennungskraftmaschinen VKM) benötigen fossilen Treibstoff. In der vorliegenden Studie wird die derzeit im Handel verfügbare Treibstoffzusammensetzung in Österreich, unter Berücksichtigung der Bioanteile betrachtet.

- **Hybrid Benzin-/Diesel-Pkw**

Ein Hybrid-Pkw hat gegenüber konventionellen Pkw zusätzlich einen Li-Ionen Akkumulator und einen Elektromotor, der gleichzeitig auch ein Generator ist, eingebaut. Dieser Akku wird mittels Verbrennung von Benzin/Diesel oder über Rekuperationsprozesse¹⁰ geladen. Der Elektromotor wird in gewissen Anwendungsfällen, wie z. B. beim Starten oder Anfahren des Fahrzeugs bzw. für Kurzstrecken, genutzt. Dadurch ergibt sich im Vergleich zu einer konventionellen Antriebstechnik insgesamt ein niedrigerer Treibstoffverbrauch – auch weil Elektromotoren wesentlich höhere Wirkungsgrade aufweisen als konventionelle Verbrennungskraftmotoren.

- **Plug-In Hybrid Benzin-/Diesel-Pkw**

Plug-In Hybrid-Fahrzeuge haben ähnlich wie Hybrid-Fahrzeuge zusätzlich Li-Ionen Akkus samt Elektromotoren eingebaut, wobei der Akku wesentlich leistungsstärker dimensioniert ist. Dadurch ist für kurze Distanzen (20-80 km) ein rein elektrisches Fahren möglich. Im Unterschied zu Hybrid-Fahrzeugen kann der Akku über das öffentliche Stromnetz geladen werden. Das bedeutet, dass eine Bilanzierung der Energiebereitstellung einerseits Benzin/Diesel und andererseits den österreichischen Strommix inkludiert. Die prozentuale Aufteilung, inwieweit der Pkw konventionell oder mittels Strom betrieben wird, ist Gegenstand der Sensitivitätsanalyse.

- **Elektrofahrzeuge BEV**

Diese Art von Fahrzeug besitzt als Antriebsquelle einen Elektromotor und als Energiespeicher einen Li-Ionen Akkumulator. Die derzeit auf dem Markt befindlichen BEV unterscheiden sich sehr stark in ihrer Dimensionierung. Deshalb werden in dieser Studie ein leichtes BEV und ein schweres BEV bilanziert. Als Energiebereitstellung werden der durchschnittliche österreichische Strommix bzw. der österreichische UZ 46 Strommix¹¹ betrachtet.

Eine genaue Beschreibung der Energiebereitstellung (z. B. Aufteilung des UZ 46 Strommixes nach erneuerbaren Energien) erfolgt im Kapitel 4.

**Akku und
Elektromotor**

**leistungsstärkerer
Akku**

¹⁰ Rekuperation: Rückgewinnung von Energie

¹¹ In dieser Studie wird ausschließlich Strom aus erneuerbaren Energieträgern, der gemäß Umweltzeichen 46 zertifiziert ist, zur Bilanzierung herangezogen.

3.4 Emissionen und Energieaufwand beim EoL-Prozess ¹²

Was passiert mit einem Pkw, nachdem er die Lebensdauer von durchschnittlich 15 Jahren erreicht hat? Diese Frage wird im sog. EoL-Prozess beantwortet. In der Regel werden Autos am Ende ihres Einsatzes geschreddert, nachdem alle leicht ausbaubaren Bestandteile entfernt wurden. Das Schreddern wird in zwei Schritten vollzogen. Der Energieaufwand (Strom/Diesel) und die direkten Emissionen (ausschließlich PM) werden in dieser Kategorie berücksichtigt. Nachfolgend wird dieser EoL-Prozess synonym für die Entsorgung der Fahrzeuge verwendet. Der EoL-Prozess wurde in der Studie Ökobilanz alternativer Antriebe. Elektrofahrzeuge im Vergleich. (UMWELTBUNDESAMT 2014) auf Grund von abweichenden Systemgrenzen nicht untersucht.

Schreddern

Als Gesamtergebnis werden sämtliche, je Kategorie auftretenden Emissionen und benötigten Energieeinsätze summiert ausgewiesen.

Emissionen und Energieeinsätze, die bei der Rohstoffaufbereitung anfallen/benötigt werden, und die bei einigen anderen Studien zum EoL-Prozess gezählt werden, werden in der vorliegenden Studie bei der Fahrzeugherstellung berücksichtigt. So werden z. B. die Aufarbeitung und der Veredelungsprozess von Alt-eisen zu neuem hochwertigem Sekundärstahl in dieser Studie nicht zum EoL-Prozess gezählt, sondern zur Fahrzeugherstellung, die am Beginn einer Lebenszyklusanalyse steht.

¹² Für diese Studie wird davon ausgegangen, dass 100 % der in Österreich verfügbaren Pkw auch tatsächlich in Österreich entsorgt werden. Ein etwaiger illegaler Export von Altautos nach z. B. Afrika wird hier nicht betrachtet. Es kann aber davon ausgegangen werden, dass diese Pkw ebenfalls am Ende ihrer Lebensdauer in irgendeiner Weise behandelt werden und die wertvollen Materialien wieder der Wertschöpfungskette zur Verfügung gestellt werden.

4 MATERIAL- UND ENERGIEBILANZ

4.1 Materialeinsatz zur Fahrzeugherstellung

Die folgende Tabelle 3 stellt den Materialeinsatz je Pkw dar¹³. Primär bzw. Sekundär bezieht sich jeweils auf die Herstellung der Materialien, wobei Sekundär jede Form von recycelten und somit wieder aufbereiteten Rohstoffen bedeutet.

¹³Die Aufteilung wurde auf Basis der Studie Ökobilanz alternativer Antriebe. Elektrofahrzeuge im Vergleich. (UMWELTBUNDESAMT 2014) adaptiert. Der Materialeinsatz stellt einen Durchschnitt dar, wobei einige Inputmaterialien auf eigenen Annahmen beruhen, die möglicherweise nicht repräsentativ sind. So ist z. B. der Einsatz von Kupfer überproportional hoch. Da anstelle von Kupfer andere Metalle eingesetzt werden können, die ebenfalls umweltrelevante Belastungen aufweisen, stellen diese Annahmen keine Einschränkung dar.

Tabelle 3: Materialeinsatz je Pkw in kg (Quelle: UMWELTBUNDESAMT 2015, eigene Annahmen).

Pkw Materialien	VKM		HEV Fzg		PHEV Fzg		BEV Fzg (leicht)		BEV Fzg (schwer)	
	Primär	Sekundär	Primär	Sekundär	Primär	Sekundär	Primär	Sekundär	Primär	Sekundär
Stahl primär	873	180	873	150	873	150	470	130	867	155
Stahl sekundär	-	693	-	723	-	723	-	340	-	712
Aluminium primär	60	10	60	10	60	10	110	10	65	10
Aluminium sekundär	-	50	-	50	-	50	-	100	-	55
Glas	37	22	37	22	37	22	25	15	37	22
Glas sekundär	-	15	-	15	-	15	-	10	-	15
Kunststoffteile	308	308	308	308	308	308	315	315	308	308
Blei primär	20	-	20	-	10	-	-	-	-	-
Blei sekundär	-	20	-	20	-	10	-	-	-	-
Sonst.	195	195	120	120	140	140	92	92	200	200
Akkumulator	-	-	25	25	120	120	175	175	200	200
Summe	1.493	1.493	1.443	1.443	1.548	1.548	1.187	1.187	1.677	1.677

Unter Sonstiges sind z. B. Kupfer, Nickel, Lacke u. a. enthalten.

Für einige Materialien wurde angenommen, dass keine Sekundärmaterialien sondern nur Primärrohstoffe eingesetzt werden (z. B. Plastikkomponenten).

Sämtliche Materialien wurden in GEMIS abgebildet, wobei auch die zur Erzeugung der Rohstoffe benötigte Energie berücksichtigt wird.

Anmerkungen zur Tabelle 3:

**Aufteilung des
Materialeinsatzes**

- Die Aufteilung des Materialeinsatzes richtet sich danach, ob für die Fahrzeugherstellung ausschließlich Primärrohstoffe oder Sekundärrohstoffe verwendet werden. Dies führt zu einem Unterschied in den Emissionen und beim Energieaufwand zwischen den beiden Produktionsarten, da Sekundärmaterialien in der Regel weniger energieintensiv erzeugt werden müssen.

**Dimensionierung
der Fahrzeuge**

- Es liegen keine Daten über eine Aufteilung, welche Rohstoffe eingesetzt werden, vor.

- Es werden bei der VKM nur Fahrzeugtypen der Klasse Euro 6 betrachtet. Die derzeit am Markt befindlichen Pkw stellen meist eine Form der Sport Utility Vehicle SUV dar, die zum Teil deutlich schwerer dimensioniert sind als vergleichbare ältere Fahrzeuge. Aus diesem Grund sind die VKM schwerer dimensioniert als z. B. die HEV, obwohl letztere zusätzlich einen Elektromotor samt Akkumulator besitzen.

- PHEV sind am schwersten, das liegt vor allem am, im Vergleich zum HEV, schwereren und leistungsfähigeren Akkumulator und Elektromotor zusätzlich zum konventionellen Antriebssystem.

- Bei reinen BEV gibt es eine sehr große Breite von verschiedenen Fahrzeugen, von großen bis kleinen BEV. Deswegen wurden zwei Arten betrachtet: leichtes und schweres BEV. In obiger Auflistung ist für jeden Pkw mit Li-Ionen Akkumulator dieser nur einmal abgebildet. Die Lebensdauer von derzeit am Markt befindlichen Li-Ionen Akkumulatoren wird sehr unterschiedlich angegeben. In dieser Studie wird von einer Lebensdauer von 7,5 Jahren ausgegangen. Die Lebensdauer der Akkus ist stark von der Dauer des Aufladens (kurz/lang) sowie vom Nutzerverhalten abhängig. Deswegen wird in der Sensitivitätsanalyse untersucht, wie sich eine Verlängerung der Akkulebensdauer auf 15 Jahre auf die Umwelteffekte auswirkt.

- Für jedes Fahrzeug wird eine durchschnittliche Lebensdauer von 15 Jahren angenommen. In dieser Zeit werden jährlich rund 13.200 km zurückgelegt.

Besetzungsgrad

- Als durchschnittlicher Besetzungsgrad wird ein Wert von jeweils 1,16 Personen pro Pkw angenommen.

Auf eine Darstellung der einzelnen Emissionsfaktoren und des KEA für die angegebenen Materialien wird an dieser Stelle verzichtet und auf die Quelle GEMIS Österreich verwiesen.

4.2 Emissionsfaktoren der Energiebereitstellung

In nachfolgender Tabelle 4 werden die Emissionsfaktoren und der KEA für die unterschiedlichen Energieträger aufgelistet. Es handelt sich hierbei immer um indirekte, aus der Energiebereitstellung resultierende Emissionen.

Energieträger	THG [g CO ₂ -eq/kWh]	NO _x [g/kWh]	PM [g/kWh]	KEA [kWh/kWh]
Benzin	65,68	0,167	0,021	1,26
Diesel	42,69	0,126	0,016	1,13
Ö-Strom	151,16	0,264	0,017	1,28
UZ 46 Strom	21,82	0,267	0,012	1,04

Tabelle 4:
Darstellung der
spezifischen
Emissionsfaktoren und
KEA je Energieträger
(Quelle: GEMIS
ÖSTERREICH 2015).

Anmerkungen zu Tabelle 4:

- Der Anteil von Biotreibstoff für Benzin/Diesel wurde schon berücksichtigt.
- Laut Angaben der OMV Aktiengesellschaft ist die Raffinerie in Schwechat für eine Dieselproduktion konzeptioniert. Das bedeutet, dass Diesel sehr effizient hergestellt werden kann.

Die Aufteilung des Strommixes auf die einzelnen Energieträger ist in den folgenden Tabellen (Tabelle 5 und Tabelle 6) dargestellt.

Der durchschnittliche österreichische Strommix wird zu rund 84 % aus Kraftwerken und zu 16 % aus Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) Kraftwerken generiert.

österreichischer Strommix

Energieträger	Kraftwerk [%]	KWK [%]
Steinkohle	7,8	0,5
Öl	0,6	1,0
Gas	10,3	9,6
Abfall	0,6	0,6
Kohlegas	2,7	0,2
Biogene	2,6	4,1
Wasserkraft	55,9	
Wind, PV, u. ä.	3,5	
Summe	84,0	16,0

Tabelle 5:
Strompark Österreich:
prozentuale Verteilung
auf die einzelnen
Energieträger für das
Jahr 2012 (Quelle:
GEMIS ÖSTERREICH
2015).

Der durchschnittliche österreichische UZ 46 Strommix wird ausschließlich über Kraftwerke generiert.

*Tabelle 6:
Prozentuale Verteilung
der Energieträger des
österreichischen UZ 46
Strommixes im Jahr
2012 (Quelle: GEMIS
ÖSTERREICH 2015).*

Energieträger	Anteil [%]
Wasser	77,6
Wind	15,4
Biomasse	3,5
Biogas	1,0
Photovoltaik	2,5

Die in Kapitel 4.2 angeführten Energieträger wurden für die Bilanzierung verwendet.

4.2.1 UZ 46 Strom

Es gibt verschiedene Betrachtungsweisen um Strom aus erneuerbaren Energieträgern zu bewerten. In dieser Studie wird ausschließlich Strom aus erneuerbaren Energieträgern, der gemäß der Richtlinie Umweltzeichen 46 (Österreichisches Umweltzeichen, Richtlinie UZ 46) zertifiziert ist, zur Bilanzierung herangezogen.

UZ 46 Strom ist Strom aus den erneuerbaren Energieträgern Biomasse (fest, flüssig und gasförmig), Geothermie, Sonne, Wind und Wasser, der die Anforderungen dieser Richtlinie erfüllt.

Anforderungen der Richtlinie Umweltzeichen 46

Strom mit dieser Zertifizierung weist die strengsten Umweltauflagen bzw. Anforderungen auf. Im Folgenden werden auszugweise einige Anforderungen der Richtlinie Umweltzeichen 46 (Österreichisches Umweltzeichen, Richtlinie UZ 46) angeführt:

- UZ 46 Strom muss zumindest 1,4 % Strom aus Photovoltaik beinhalten.
- Der Anteil an eingesetzter Wasserkraft darf bis zu 79 % betragen. Unabhängig von der Größe und der installierten Leistung werden für Wasserkraftwerke in der Richtlinie umfassende ökologische Anforderungen an den Standort sowie an die Betriebsführung gestellt. Es muss z. B. durch bauliche Maßnahmen die ganzjährige Durchgängigkeit für Fische gewährleistet sein.
- UZ 46 Strom muss im Portfolio mindestens 10 % Strom aus Anlagen enthalten, die nicht älter als fünfzehn Jahre sind (ab Erstinbetriebnahme) oder in den letzten fünfzehn Jahren revitalisiert bzw. erweitert wurden, wobei das elektrische Arbeitsvermögen um mindestens 15 % vergrößert werden musste.

Das Umweltzeichen ist ein vom Bundesministerium für ein lebenswertes Österreich vergebenes, staatliches Gütesiegel und wird an Produkte, Tourismusbetriebe und Bildungseinrichtungen verliehen.

Eine genaue Definition des UZ 46 Stromes befindet sich auf der Webseite des österreichischen Umweltzeichens: <http://www.umweltzeichen.at>

5 BERECHNUNGSMETHODE UND SENSITIVITÄTSANALYSEN

5.1 Berechnungsmethode

Mit Hilfe von GEMIS werden die Fahrzeuge „nachgebaut“, wobei hier sämtliche Materialien, der Besetzungsgrad, die Lebensdauer, die Jahreskilometer etc. berücksichtigt werden. Zudem kann mit den Daten der direkten CO₂-Emissionen aus NEMO/HBEFA 3.1 in GEMIS der korrespondierende, spezifische Verbrauch der Fahrzeuge eingestellt und in weiterer Folge sämtliche daraus resultierenden Ergebnisse ermittelt werden. Der EoL-Prozess wird ebenfalls mit Hilfe von GEMIS nachgebildet.

GEMIS Österreich

Die Ergebnisse der Berechnungen werden je Fahrzeugkilometer ausgewiesen.

5.2 Sensitivitätsanalyse

Die Sensitivitätsanalysen sind schon in den vorangehenden Kapiteln beschrieben worden und werden an dieser Stelle noch einmal zusammengefasst und ergänzt.

5.2.1 Fahrzeugproduktion

Die Fahrzeugproduktion wird für zwei Arten von Rohstoffen analysiert, einmal für ausschließlich Primärrohstoffe und einmal für hauptsächlich Sekundärrohstoffe. Bei einigen Materialien (z. B. Aluminium, Glas, einige Plastikteile etc.) wird angenommen, dass aus Qualitätsgründen nicht zu 100 % auf Sekundärmaterialien zurückgegriffen werden kann (siehe dazu auch Tabelle 3).

Die Auswirkungen des Einsatzes von Primärmaterialien werden bilanziert, da nicht gewährleistet werden kann, dass hauptsächlich Sekundärrohstoffe aus z. B. Altfahrzeugen zur Neuproduktion eingesetzt werden.

Primär- vs. Sekundärrohstoffe

Anhand der Sensitivitätsanalyse wird deutlich, dass es hinsichtlich THG- und Luftschadstoffemissionen bzw. KEA sehr sinnvoll ist, Sekundärrohstoffe zu verwenden.

5.2.2 Li-Ionen Akku

Die Lebensdauer von Li-Ionen Akkus variiert auf Grund des unterschiedlichen Ladeverhaltens und der Qualität der Zelle sehr stark. Es kann nicht gewährleistet werden, dass ein Akkumulator für die Fahrzeuglebensdauer von 15 Jahren ausreicht. Zukünftige Entwicklungen werden die Lebensdauer von Akkus erhöhen, weshalb in dieser Sensitivitätsanalyse von einer Lebensdauer von 15 Jahren ausgegangen wird.

Lebensdauer Akku

Es ist von besonderer Bedeutung die Akkumulatoren so schonend wie möglich zu nutzen bzw. darauf zu achten, dass deren Lebensdauer und Energieinhalt durch technologische Fortschritte erhöht werden, da die Akkusysteme vor allem für reine BEV einen starken Beitrag zu den Umweltbelastungen liefern.

5.2.3 Direkter Energiebedarf

Energieeinsatz und Fahrsituation

Die Umwelteffekte jedes Pkws hängen unmittelbar von der eingesetzten Energie ab. Daher wird in dieser Sensitivitätsanalyse untersucht, inwieweit sich unterschiedliche Energieeinsätze im Fahrbetrieb auf die Ergebnisse der Gesamtbilanz auswirken. Zudem ergeben sich große Unterschiede, je nachdem wie und wo das Fahrzeug gefahren wird. Es werden daher die Fahrsituationen innerorts, außerorts und auf Autobahnen simuliert. Dabei kann für die direkten Emissionen und Energieeinsätze auf durchschnittliche österreichische Realdaten aus den Datenbanken NEMO/HBEFA zurückgegriffen werden. Die Sensitivitätsanalyse zeigt, welchen Einfluss die Fahrsituation auf den Energieaufwand und somit die Gesamtbilanz des Fahrzeugs hat.

Für rein elektrisch betriebenen Fahrzeuge, für die es derzeit keine Realdaten aus NEMO/HBEFA gibt, wird der Energiebedarf variiert. In einer innerstädtischen Fahrsituation kann es durch den Rekuperationsprozess zu deutlichen Einsparungen kommen. Wenn zusätzlich andere elektrische Verbraucher wie Heizung, Radio etc. nicht verwendet werden und die Fahrweise sehr ökonomisch ist, wird eine Einsparung von 50 % angenommen. Bei einer Verwendung des BEV auf der Autobahn inkl. Betrieb von unterschiedlichen elektrischen Verbrauchern erhöht sich der Energiebedarf deutlich. Für die Sensitivitätsanalyse wird daher ein Mehrverbrauch von 50 % bei Fahrbetrieb auf der Autobahn angenommen. Einige nicht repräsentative Versuche von Kolleg/innen des Umweltbundesamtes, bei denen unterschiedliche Elektrofahrzeuge im Realbedarf getestet wurden, unterstützen diese Annahmen.

6 ERGEBNISSE DER ÖKOBILANZ

Im aktuellen Kapitel sind die Ergebnisse der Lebenszyklusanalysen auf Basis der in den vorangehenden Kapiteln getroffenen Hintergrunddaten und Annahmen dargestellt. Diese werden getrennt nach Emissionen (THG, NO_x, PM) und nach Energieaufwand (KEA) je Fahrzeugkilometer (Fkm) ausgewiesen.

Den folgenden Darstellungen liegt folgende Annahme über die Aufteilung der Fahrsituation zu Grunde:

Autobahn	Außerorts	Innerorts
34 %	37 %	28 %

Annahme zur Fahrsituation

*Tabelle 7:
prozentuelle Verteilung
der Fahrsituation (Quelle:
NEMO/HEBFA 2015).*

Sämtliche Ergebnisse in diesem Kapitel beziehen sich auf diese Fahrsituationen und stellen somit einen Durchschnittswert dar.

Bei der Fahrzeugproduktion ist ebenfalls ein Durchschnitt angenommen, der sich aus $\frac{2}{3}$ Sekundär- und $\frac{1}{3}$ Primärrohstoffen zusammensetzt (siehe Tabelle 3). Durch die neue EU Altfahrzeuge-Richtlinie 2015 (Altfahrzeuge-Richtlinie, RL 2000/53/EG) muss die Wiederverwendungs- bzw. Verwertungsrate 95 % des Gewichtes eines Altfahrzeugs betragen. Eine exakte Aussage darüber, wie viel % des bei der Fahrzeugherstellung eingesetzten Stahls/ Aluminiums etc. aus Primär- bzw. Sekundärquellen kommen, ist nicht möglich. Es kann allerdings davon ausgegangen werden, dass überwiegend Sekundärmaterialien eingesetzt werden.

Annahme zur Fahrzeugproduktion

Bei sämtlichen elektrischen Antriebsarten (Hybrid, Plug-In Hybrid und BEV) wird davon ausgegangen, dass der Li-Ionen Akkumulator einmal in der Fahrzeuglebensdauer von 15 Jahren nachgefragt wird¹⁴. Das bedeutet, dass insgesamt zwei Akkus (zweifache Produktion bzw. EoL-Prozess) benötigt werden.

Annahme zum Akkumulator

6.1 Emissionen

Im folgenden Kapitel werden die Ergebnisse der Lebenszyklusanalyse für THG- und Luftschadstoffemissionen dargestellt.

6.1.1 THG-Emissionen

Die CO₂-eq Emissionen pro Fahrzeugkilometer werden getrennt nach den oben erwähnten Bereichen (direkte Emissionen, indirekte Emissionen der Fahrzeugherstellung, Energiebereitstellung, Akkuproduktion und Entsorgung/EoL-Prozess), dargestellt.

¹⁴ Eine Untersuchung der Auswirkungen ohne zusätzliche Nachfrage wird in den Sensitivitätsanalysen betrachtet.

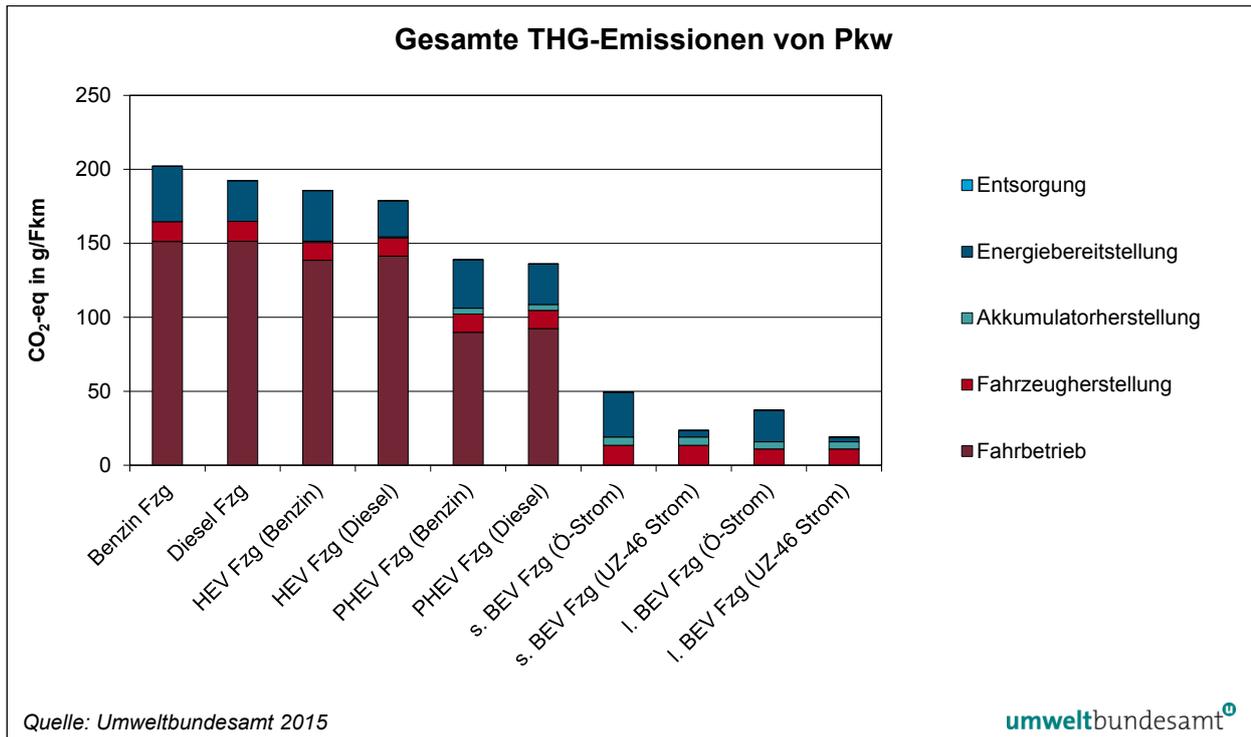


Abbildung 6: Gesamte Treibhausgasemissionen in CO₂-eq/Fkm verschiedener Pkw-Antriebsarten.

direkte THG-Emissionen

Abbildung 6 zeigt, dass die meisten direkten THG-Emissionen von rund 150 g/Fkm bei den konventionell (mit fossilen Treibstoffen) betriebenen Pkw anfallen. Hybrid-Fahrzeuge liegen bei den direkten Emissionen mit 140 g/Fkm knapp darunter. Mit rund 90 g/Fkm verursachen Plug-In Hybrid-Pkw deutlich weniger THG-Emissionen. Bei rein elektrisch betriebenen Fahrzeugen entstehen durch den Elektromotor keine direkten Treibhausgase. Die direkten Emissionen sind bei den konventionellen Benzin/Diesel-Fahrzeugen sowie für die Hybrid-Varianten annähernd gleich groß.

indirekte THG-Emissionen

Die indirekten THG-Emissionen der Fahrzeugherstellung liegen bei sämtlichen Fahrzeugen in der Größenordnung von rund 12–13 g/Fkm. Das leichte Elektroauto (l. BEV) weist die geringsten THG-Emissionen in diesem Bereich auf. Es ist allerdings zu beachten, dass die THG-Emissionen der Akkumulatorherstellung gesondert dargestellt werden. Sie sind beim schweren Elektroauto (s. BEV) am größten. Dieses Fahrzeug hat einen Akkumulator von 200 kg eingebaut. Bei den BEV die mittels UZ 46 Strom aufgeladen werden, belaufen sich die Emissionen aus der Akkuherstellung auf 25 % der Gesamtemissionen. Eine lange Akkulebensdauer wirkt sich daher positiv auf die Ökobilanz von Elektrofahrzeugen aus.

Emissionen der Energiebereitstellung

Die indirekten THG-Emissionen der Energiebereitstellung unterscheiden sich bei den einzelnen Pkw-Antriebsarten deutlich. Benzin wird energieintensiver hergestellt als Diesel (siehe auch Tabelle 4). Benzin-Fahrzeuge verbrauchen zudem mehr Treibstoff (in l/100km) als Diesel-Fahrzeuge. Daraus ergeben sich die deutlichen Unterschiede für diese beiden Energieträger. Ein konventionelles Dieselloauto verursacht um 26 % weniger indirekte THG-Emissionen in der Energiebereitstellung als ein Benzinauto. Beim Hybrid-Fahrzeug bleibt dieser Vergleichswert zwischen Diesel und Benzin mit 29 % annähernd gleich und beim Plug-In Pkw reduziert sich dieser Wert auf 16 %. Auf Grund der zusätzlichen elektrischen

Energieversorgung beim Plug-In Fahrzeug werden die Vorteile von Diesel bei der Energiebereitstellung etwas abgeschwächt. Bei der elektrischen Energieversorgung stellen sich noch größere Unterschiede bei den THG-Emissionen zwischen dem durchschnittlichen österreichischen Strommix und dem UZ 46 Strom von 86 % dar.

Die aus dem EoL-Prozess resultierenden THG-Emissionen tragen, unter den, dieser Studie zu Grunde liegenden Annahmen, nur unwesentlich zu den Gesamtemissionen bei. Hier zeigt sich, dass der Akkumulator die treibende Größe darstellt, da exemplarisch das schwere Elektrofahrzeug mehr als die doppelten Emissionen für den EoL-Prozess produziert als Benzin/Diesel Fahrzeuge, bei denen kein EoL-Prozess des Akkus berücksichtigt werden muss.

Werden die Gesamtemissionen (Summe der oben beschriebenen Emissionen) betrachtet, zeigt sich, dass das konventionell betriebene Benzin-Fahrzeug die meisten THG-Emissionen verursacht. Elektrofahrzeuge haben mindestens um den Faktor 4 (österreichischer Strommix) bis maximal 10 (UZ 46 Strom) weniger Emissionen. Damit ist ganz klar, dass ein Umstieg auf eine Elektrofahrzeugflotte, selbst bei Betrieb mittels österreichischen Durchschnittstroms, die THG-Emissionen drastisch reduzieren kann.

Mit Diesel betriebene Fahrzeuge stoßen weniger CO₂-eq Emissionen aus als mit Benzin betriebene Fahrzeuge. Den größten Anteil der THG-Emissionen machen mit Ausnahmen der BEV die direkten Emissionen aus.

Emissionen des EoL-Prozesses

Gesamtemissionen im Vergleich

6.1.2 NO_x-Emissionen

Die Ergebnisse der Stickoxidemissionen sind in nachfolgender Abbildung 7 dargestellt.

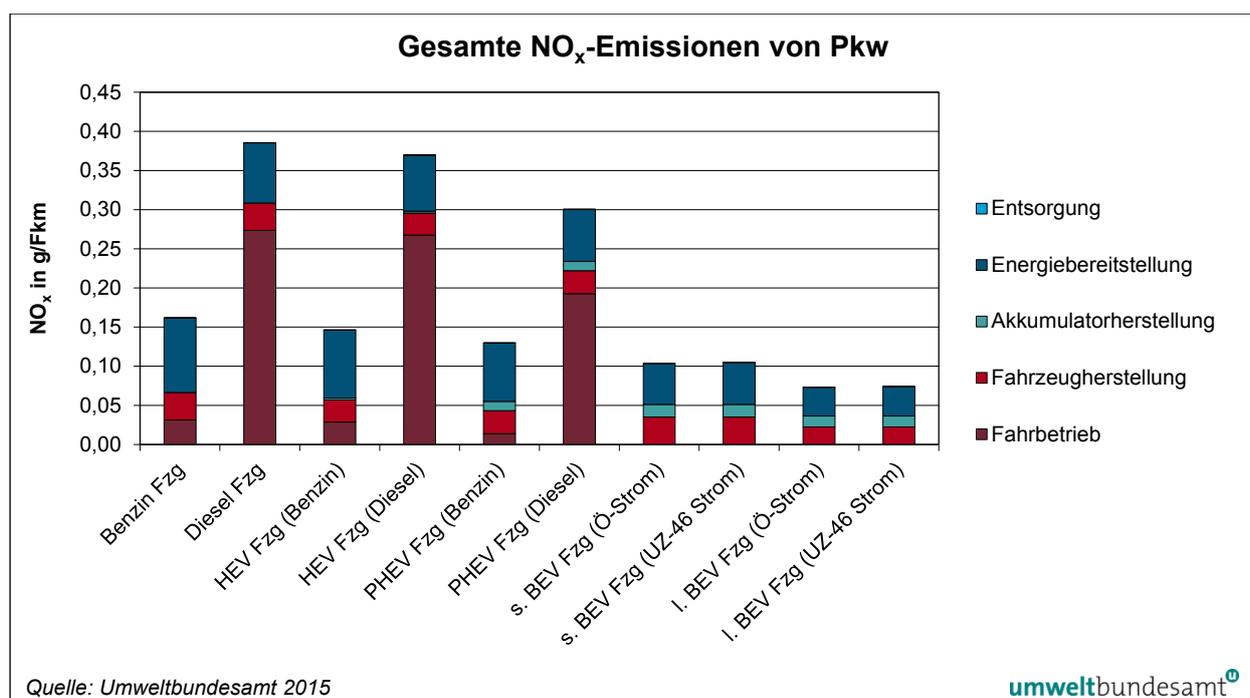


Abbildung 7: Gesamte Stickoxidemissionen in g/Fkm verschiedener Antriebsarten.

NO_x-Emissionen bei Diesel-Fahrzeugen

NO_x-Emissionen sind hauptsächlich bei dieselbetriebenen Fahrzeugen problematisch. Diese Tatsache wird durch Abbildung 7 verdeutlicht. Ein Plug-In Diesel-Fahrzeug hat rund 14-mal höhere direkte Emissionen als ein Plug-In Benzin-Fahrzeug. Auf der anderen Seite kann eine elektrische Antriebsunterstützung die direkten Emissionen stark reduzieren, so hat z. B. das Plug-In Benzin-Fahrzeug um die Hälfte weniger direkte NO_x-Emissionen als das konventionell betriebene Benzin-Fahrzeug. Bei Diesel-Fahrzeugen wirkt sich eine elektrische Antriebsunterstützung nicht so stark aus.

Die Emissionen aus der Fahrzeugherstellung sind für sämtliche Fahrzeuge in der gleichen Größenordnung, wobei es Vorteile für die leichten Fahrzeuge gibt.

NO_x-Emissionen aus der Akkuherstellung

Die NO_x-Emissionen aus der Akkuherstellung belaufen sich auf weniger als 1 % der Gesamtemissionen beim Hybrid Diesel-Pkw, aber auf rund 19 % beim leichten Elektrofahrzeug. Verantwortlich für den hohen Anteil des Akkumulators zeigt sich der Einsatz von Aluminium und Kupfer.

Indirekte Emissionen aus der Energiebereitstellung

Die indirekten Emissionen aus der Energiebereitstellung weisen für Diesel/Benzin nicht so starke Unterschiede wie bei den THG-Emissionen auf, wobei auch in diesem Fall die Dieselproduktion weniger Emissionen verursacht. Die indirekten Emissionen aus diesem Bereich haben für alle Benzin-Fahrzeuge und BEV den größten Anteil an den Gesamtemissionen. Ein interessantes Ergebnis liefert der Vergleich der NO_x-Emissionen aus der Stromgenerierung. UZ 46 Strom verursacht genauso viele Stickoxidemissionen wie der österreichische Durchschnittsstrom¹⁵. Das liegt in erster Linie daran, dass im UZ 46 Strom anteilmäßig wesentliche mehr Strom aus Biomasse inkludiert ist und Biomasse deutlich höhere NO_x-Emissionen als andere alternative Stromquellen aufweist. Diese stammen hauptsächlich aus dem Verbrennungsvorgang.

Der EoL-Prozess ist für diese Art von Luftschadstoffen nicht relevant.

gesamte NO_x-Emissionen

Bei Betrachtung der gesamten NO_x-Emissionen zeigt sich eindrucksvoll, dass die Diesel-Pkw mit Abstand am schlechtesten bilanzieren. Der beste Diesel (PHEV) hat im Vergleich zum schlechtesten Benzin-Fahrzeug (konventionell) immer noch um rund 50 % mehr NO_x-Emissionen. Die Problematik der Stickoxide kann nur dann adressiert werden, wenn es weniger Diesel-Fahrzeuge gibt. Zwischen Plug-In Benzin-Fahrzeug und schwerem BEV (UZ 46 Strom) liegt nur ein kleiner Unterschied von 0,025 g/Fkm.

6.1.3 PM-Emissionen

In diesem Unterkapitel werden die Partikelemissionen (Abbildung 8) dargestellt. Direkte PM-Emissionen spielen nur eine untergeordnete Rolle. In dieser Studie wird von voll funktionsfähigen Partikelfiltersystemen ausgegangen, die mittlerweile standardmäßig in den betrachteten Fahrzeugen eingebaut sind. Deswegen gibt es auch kaum Unterschiede zwischen Diesel- und Benzin-Pkw.

¹⁵ streng genommen fallen beim UZ 46 Strom sogar geringfügig mehr NO_x-Emissionen pro kWh an

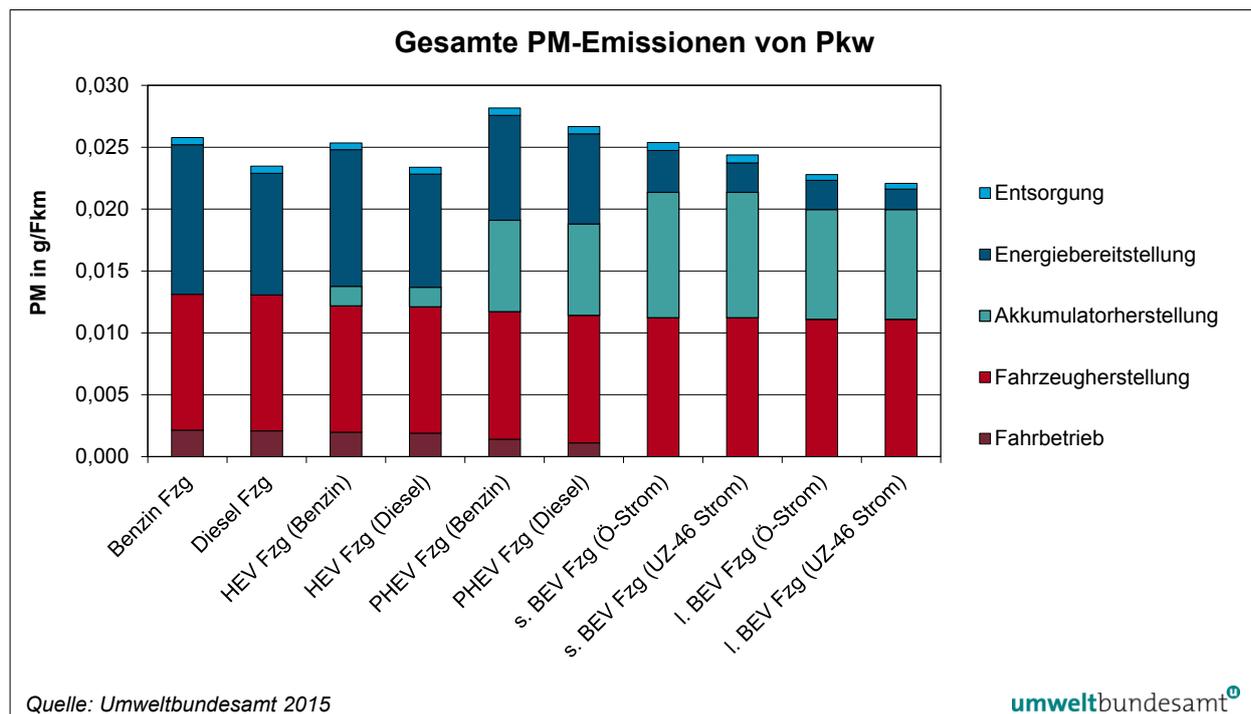


Abbildung 8: Gesamte Partikelemissionen in g/Fkm verschiedener Antriebsarten.

Einen wesentlichen Anteil an den PM-Emissionen hat die Fahrzeugherstellung. Hier spielt die Stahlproduktion neben der Aluminiumherstellung eine große Rolle. Wird der Akku ebenfalls zu den herstellungsbedingten, indirekten Emissionen gezählt, stammen beim leichten BEV rund 90 % der PM-Emissionen aus der Herstellung des Fahrzeugs. Bei elektrisch betriebenen Fahrzeugen (vor allem die BEV und die Plug-In Varianten) stellt die Herstellung und Entsorgung des Akkumulator die wesentliche Feinstaubquelle dar. Hier kann eine möglichst lange Lebensdauer positive Effekte bewirken. Hauptverantwortlich für die PM-Emissionen beim Akkumulator ist die Aluminium Produktion.

Wie schon bei den THG- und NO_x-Emissionen hat Diesel in der Bereitstellung tendenziell weniger PM-Emissionen als Benzin, wengleich hier der Unterschied klein ist. Die Stromproduktion verursacht deutlich weniger PM-Emissionen als fossile Treibstoffe.

Auffällig ist der hier verhältnismäßig hohe Anteil des EoL-Prozesses an den Gesamtemissionen. Diese Emissionen stammen vorwiegend aus dem Energieaufwand und den direkten Staubemissionen die durch das Shreddern der Altfahrzeuge anfallen.

Für die Gesamtemissionen zeigen sich kaum Unterschiede zwischen konventionell und alternativ betriebenen Fahrzeugen.

PM-Emissionen der Fahrzeugherstellung

PM-Emissionen des EoL-Prozesses

6.2 Kumulierter Energieaufwand

Der kumulierte Energieaufwand setzt sich aus der direkten, für den Antrieb benötigten, Energie bzw. aus den vorgelagerten Energieeinsätzen der Fahrzeugherstellung, der Energiebereitstellung etc. zusammen.

Tabelle 8 zeigt die direkten Energieeinsätze¹⁶ (fossil und elektrisch) je Fahrzeug.

Tabelle 8:
direkte Energieeinsätze
in kWh/Fkm. (Quelle:
HBEFA/NEMO 2015)

Typ	direkte Energieeinsatz fossil [kWh/Fkm]	direkte Energieeinsatz elektrisch [kWh/Fkm]
Benzin Fzg	0,57	
Diesel Fzg	0,61	
Hybrid Fzg (Benzin)	0,52	
Hybrid Fzg (Diesel)	0,57	
Plug-In Hybrid Fzg (Benzin)	0,34	0,07
Plug-In Hybrid Fzg (Diesel)	0,37	0,08
schweres BEV		0,20
leichtes BEV		0,14

Die Daten für die fossil betriebenen Fahrzeuge stammen aus NEMO/HBEFA und stellen den österreichischen Durchschnitt dar. Der Verbrauch der BEV stellt eine Annahme dar, die auf einer Auswertung einer repräsentativen Datensammlung (spritmonitor.de) und einer Fahrzeugdatenblatt-Recherche unterschiedlicher BEV beruht.

Abbildung 9 zeigt den KEA für die unterschiedlichen Fahrzeugtypen.

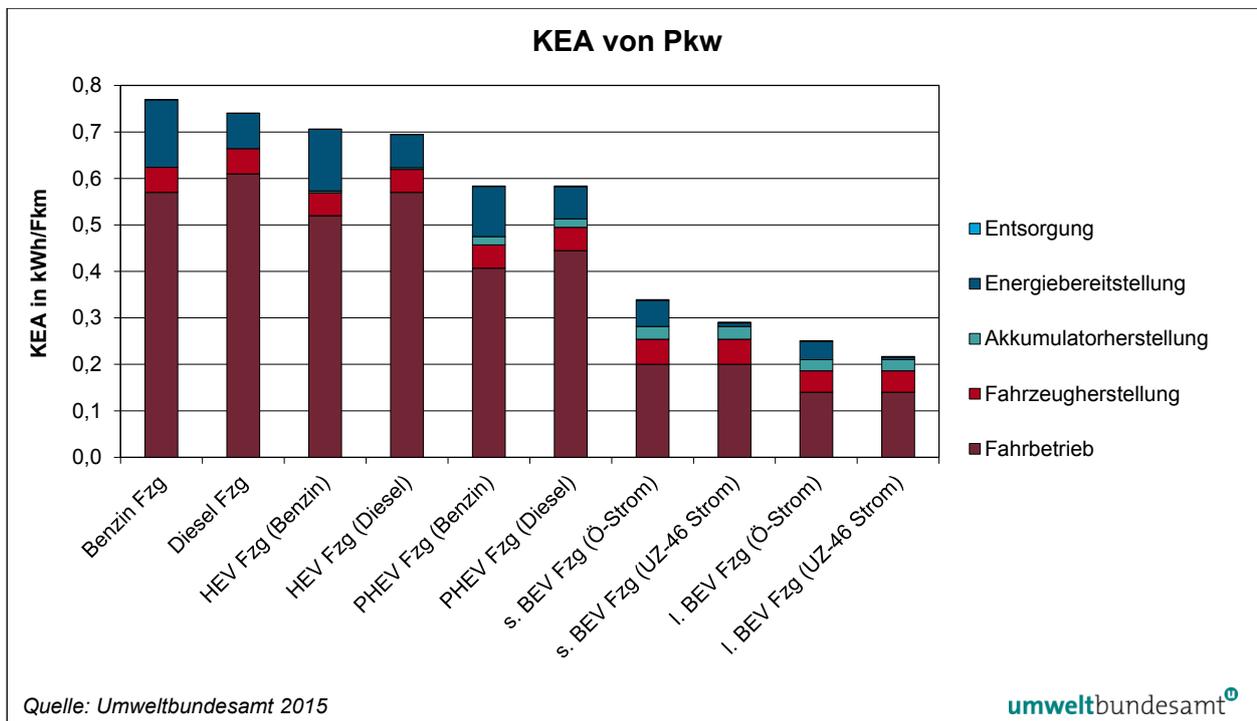


Abbildung 9: Kumulierte Energieaufwand (KEA) in Kilowattstunden pro Fkm verschiedener Antriebsarten.

¹⁶ Der direkte Energieeinsatz wird auch als spezifischer Verbrauch bezeichnet. Zu beachten ist, dass hier der Verbrauch in der gängigen Energieeinheit Kilowattstunde (kWh) pro Fahrzeugkilometer ausgewiesen ist und nicht in Liter Treibstoff pro 100 Kilometer (l/100 km).

Einige Aussagen aus dem Kapitel über die Emissionen gelten auch für den KEA: So ist klar der Unterschied in der Energiebereitstellung zwischen Diesel/Benzin und Ö-Strom/UZ 46 Strom ersichtlich. In den Berechnungen werden deutlich niedrigere Energieeinsätze für die Dieselproduktion angenommen; das erklärt den vorteilhafteren KEA der Diesel- im Vergleich zur Benzinbereitstellung. Der Energieaufwand bei der Fahrzeugherstellung und der Materialeinsatz sind für alle Fahrzeuge ungefähr gleich; somit liegt auch die Umweltbelastung der einzelnen Fahrzeuge in der gleichen Größenordnung. Den mit Abstand größten Anteil am KEA hat der direkte Energieeinsatz. Die Akkuherstellung spielt in erster Linie bei den BEV eine Rolle. Der EoL-Prozess hat nur einen vernachlässigbaren Energiebedarf.

Gut zu erkennen ist der energetische Vorteil der elektrischen Traktion. BEV benötigen insgesamt wesentlich weniger Energie. Das liegt am hohen Wirkungsgrad des Elektromotors gegenüber einem konventionellen Verbrennungsmotor. Der KEA eines leichten Elektrofahrzeuges (UZ 46 Strom) liegt um den Faktor 3,5 unter dem KEA eines konventionellen Benzin-Fahrzeuges.

7 ERGEBNISSE DER SENSITIVITÄTSANALYSE

Motivation Die Sensitivitätsanalyse dient der Darstellung der Auswirkungen veränderter Rahmenbedingungen auf die Untersuchungsergebnisse. Beispielhaft kann hier der Einfluss der Fahrsituation genannt werden.

Es macht bei Betrachtung der Treibhausgas- und Luftschadstoffemissionen bzw. des kumulierten Energieaufwands einen großen Unterschied, ob ein Plug-In Fahrzeug in der Stadt betrieben, hauptsächlich elektrisch fährt und damit Umweltauswirkungen ähnlich jenen von BEV verursacht oder ob dieses Fahrzeug hauptsächlich auf der Autobahn gefahren wird, was hinsichtlich der Umwelteffekte praktisch einem Betrieb eines konventionell fossil betriebenen Fahrzeug entspricht. Diese Unterscheidung kann mit Durchschnittswerten nicht abgebildet werden; dazu dient die Sensitivitätsanalyse.

In diesem Kapitel werden die unterschiedlichen Sensitivitätsanalysen miteinander verknüpft und immer zwischen einem Best- und Worstcase Szenario unterschieden.

Parameter Folgende Parameter wurden bei den Berechnungen variiert:

- Fahrzeugherstellung (Primär-, Sekundärrohstoffe),
- Akkumulatorlebensdauer (7,5 oder 15 Jahre),
- Strombereitstellung (Österreichischer Strommix – UZ 46 Strommix),
- Fahrsituation (innerorts, außerorts/Landstraße oder Autobahn).

Szenarien Das Bestcase Szenario bezieht sich dabei immer auf jene Situationen mit den geringsten Emissionen/Energieeinsätzen, das Worstcase Szenario analog auf die Bedingungen mit den meisten Treibhausgas- und Luftschadstoffemissionen bzw. kumulierten Energieaufwand.

Nachfolgend werden die Grundannahmen für die Sensitivitätsanalyse dargestellt:

Fahrzeugherstellung

Die Emissionen und der kumulierte Energieaufwand in der Fahrzeugherstellung hängen sehr stark davon ab, ob Primär- oder Sekundärrohstoffe eingesetzt werden. Nachfolgende Tabelle stellt die Unterschiede dieser beiden Herstellungsverfahren dar.

*Tabelle 9:
Gegenüberstellung der
Emissionen und des
kumulierten
Energieaufwandes bei
Verwendung von
Primär- bzw.
Sekundärrohstoffen zur
Fahrzeugherstellung
(Quelle: GEMIS
ÖSTERREICH 2015).*

Herstellung	THG [g CO ₂ -eq/Fkm]	NO _x [g/Fkm]	PM [g/Fkm]	KEA [kWh/Fkm]
Konvent. Fzg prim.	19,77	0,06	0,02	0,07
Konvent. Fzg sek.	10,19	0,02	0,01	0,04
HEV Fzg prim.	18,82	0,05	0,02	0,07
HEV Fzg sek.	10,01	0,02	0,01	0,04
PHEV Fzg prim.	22,38	0,06	0,03	0,09
PHEV Fzg sek.	13,24	0,03	0,01	0,06
s. BEV Fzg prim.	25,45	0,07	0,03	0,10
s. BEV Fzg sek.	15,76	0,04	0,02	0,07
l. BEV Fzg prim.	20,46	0,05	0,03	0,08
l. BEV Fzg sek.	13,52	0,03	0,02	0,06

Bei der Einteilung in Best- bzw. Worstcase bedeutet dies, dass für den ersten Fall sämtliche Materialien bei der Fahrzeugproduktion aus Sekundärrohstoffen bestehen bzw. für den Worstcase ausschließlich Primärrohstoffe verwendet werden. Eine Ausnahme bilden z. B. Plastikkomponenten, bei denen davon ausgegangen wird, dass aus Qualitätsgründen nur Primärmaterialien zum Einsatz kommen.

Akku-Lebensdauer

Die Lebensdauer der Akkumulatoren spielt bei Lebenszyklusanalysen von Elektrofahrzeugen eine maßgebliche Rolle. Für die bisherigen Berechnungen wurde immer von einer Lebensdauer von 7,5 Jahren ausgegangen (siehe 6. Ergebnisse der Ökobilanz). In der Sensitivitätsanalyse werden die Auswirkungen auf die Ergebnisse untersucht, wenn die Lebensdauer auf 15 Jahre erhöht wird. Tabelle 10 zeigt die Emissionen und den KEA der Produktion und Entsorgung eines Li-Ionen Akkus.

Akku-Lebensdauer: 7–15 Jahre

Fahrzeug	THG [g CO ₂ -eq/Fkm]	NO _x [g/Fkm]	PM [g/Fkm]	KEA [kWh/Fkm]
HEV Fzg	0,43	0,001	0,001	0,002
PHEV Fzg	2,05	0,006	0,004	0,009
s. BEV Fzg	2,87	0,008	0,005	0,014
I. BEV Fzg	2,51	0,007	0,004	0,012

*Tabelle 10:
Emissionen und
kumulierter Energie-
aufwand bei der Pro-
duktion eines Li-Ionen
Akku (Quelle: GEMIS
ÖSTERREICH 2015).*

Bestcase bedeutet eine Akku-Lebensdauer von 15 Jahren. Im Worstcase reduziert sich die Lebensdauer auf 7,5 Jahre; das bedeutet, dass der Akku einmal nachgefragt werden muss, da die Lebensdauer der Fahrzeuge nicht variiert wird. Für das Worstcase Szenario summieren sich die Emissionen und der KEA aus der zweifachen Akkumulatorherstellung samt anschließendem zweimaligem EoL-Prozess.

Österreichischer Strommix – UZ 46 Strommix

Für elektrische betriebene Fahrzeuge ergeben sich gravierende Unterschiede in der Ökobilanz, je nachdem welcher Strom für das Beladen der Akkumulatoren verwendet wird. Die in Kapitel 6. Ergebnisse der Ökobilanz vorgestellten Ergebnisse haben diesen Umstand schon aufgezeigt. In der Sensitivitätsanalyse wird der Unterschied in der Stromproduktion noch einmal genauer untersucht.

Für das Bestcase Szenario wird UZ 46 Strom angenommen und für das Worstcase Szenario der durchschnittliche österreichische Strommix.

Fahrsituation (innerorts, außerorts/Landstraße oder Autobahn)

Im Folgenden wird innerorts mit IO, außerorts/Landstraße mit AO und Autobahn mit AB abgekürzt.

Im Gegensatz zu den o. a. Parametern lassen sich mit Ausnahme der BEV keine einfachen Best- bzw. Worstcase Szenarien bilden, die für sämtliche umweltrelevanten Parameter und den KEA gleichermaßen gültig sind. Auf diesen Umstand wird im nachfolgenden Ergebnisteil ausführlich eingegangen. Für BEV ist bei allen Parametern die Fahrsituation IO der Bestcase und die Fahrsituation AO der Worstcase.

Zusammenfassend gilt für die Best- bzw. Worstcase Szenarien Tabelle 11:

*Tabelle 11:
Einteilung der
Szenarien, die für
sämtliche Emissionen
bzw. den KEA gültig
sind (Quelle: UMWELT-
BUNDESAMT 2015).*

Bestcase	Worstcase
Fahrzeugproduktion hauptsächlich aus Sekundärmaterialien	Fahrzeugproduktion hauptsächlich aus Primärmaterialien
Akkulebensdauer 15 Jahre	Akkulebensdauer 7,5 Jahre (d. h. 2-fache Akkuproduktion und 2-facher EoL-Prozess)
UZ 46 Strom bei BEV	Österreichischer Strommix bei BEV
IO bei BEV	AB bei BEV

Die Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse stellen eine Bandbreite dar, wobei weder der Best- noch der Worstcase einen tatsächlichen Wert widerspiegeln muss. Der reale Wert wird in dieser Bandbreite liegen. Diese Darstellung verdeutlicht, dass die Ergebnisse stark von der Fahrsituation und der Fahrzeugherstellung abhängen.

7.1 THG-Emissionen

Unter Berücksichtigung der erwähnten Variationen wird in Abbildung 10 die Bandbreite des Bestcase und Worstcase Szenarien für die gesamten THG-Emissionen dargestellt.

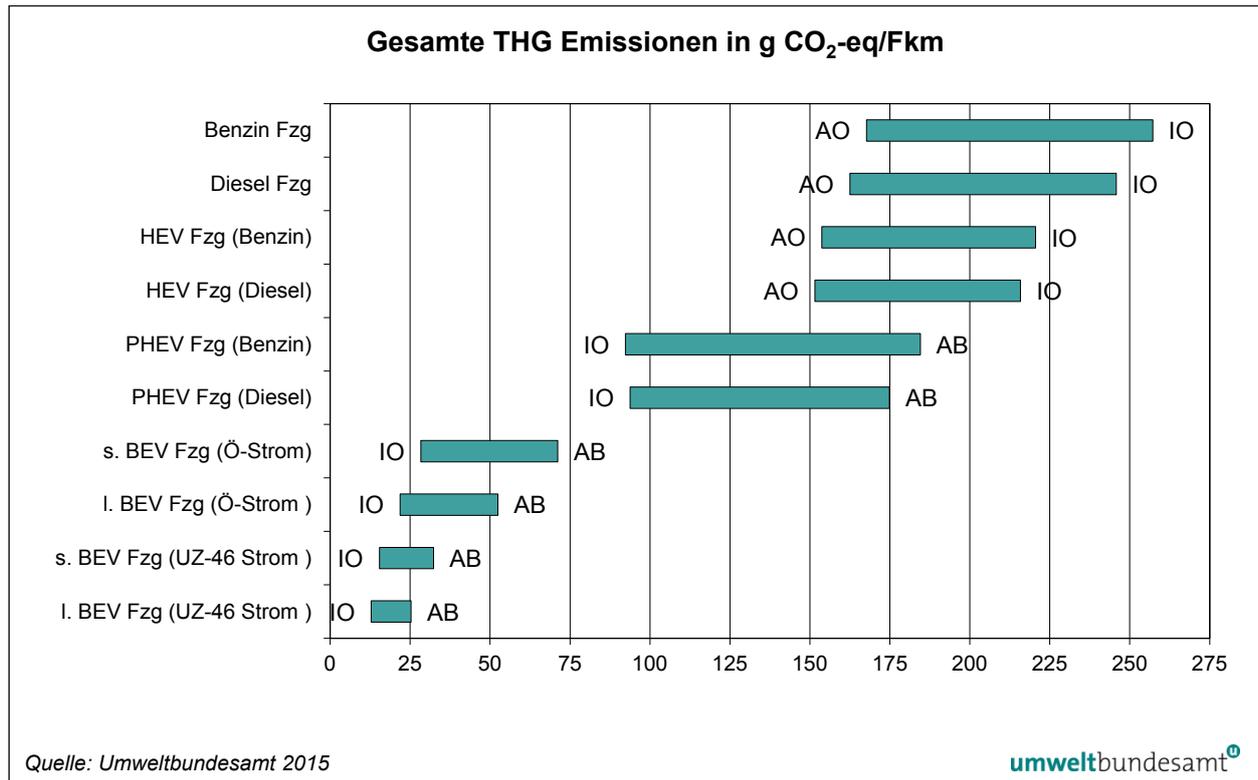


Abbildung 10: Bandbreite der gesamten CO₂-eq Emissionen bei Variation von unterschiedlichen Parametern.

Für das Benzin-Fahrzeug setzt sich das Bestcase Szenario mit rd. 170 g CO₂-eq/Fkm aus der Fahrsituation außerorts und der Verwendung von Sekundärrohstoffen bei der Fahrzeugproduktion zusammen. Das Worstcase Szenario mit etwas mehr als 250 g CO₂-eq/Fkm ergibt sich aus der Fahrsituation innerorts und bei Verwendung von Primärrohstoffen.

Szenarien Benzin-Fahrzeug

Das Bestcase Szenario für das leichte BEV (UZ 46 Strom) resultiert aus der Fahrsituation innerorts, der Verwendung von Sekundärrohstoffen sowie einer Akkulebensdauer von 15 Jahren und verursacht rund 15 g CO₂-eq/Fkm. Die Fahrsituation Autobahn zusammen mit der Verwendung von Primärrohstoffen und einer Akkulebensdauer von 7,5 Jahren bilden das Worstcase Szenario mit 25 g CO₂-eq/Fkm.

Aussagen, die aus Abbildung 10 abgeleitet werden können und weitere Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse:

Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse

- BEV haben selbst mit ungünstig angenommen Parametern zum Teil deutlich weniger Gesamtemissionen als fossil betriebene Pkw mit günstig angenommen Parametern.
- Plug-In Pkw haben ihre geringsten klimatologischen Belastungen bei IO Betrieb, können aber bei Betrieb auf AB mehr THG-Emissionen verursachen als der Betrieb eines Hybriden bzw. konventionell AO betriebenen Fahrzeugs.
- Beim BEV und Plug-In variieren Best und Worstcase um über 100 %.
- Eine Erhöhung der Lebensdauer des Lithium Ionen Akkumulators führt im Bestcase Szenario zu einer Gesamtemissionsreduktion für leichte BEV um 14 %.

- Zwischen Bestcase BEV und Worstcase fossil (Benzin-/Diesel-Fahrzeug liegt ein Faktor 20, das bedeutet, dass ein Benzin-Fahrzeug IO mehr als 20-mal mehr THG-Emissionen bedingt als der Betrieb eines leichten BEV (UZ 46 Strom).
- Die Verwendung von Sekundärmaterialien kann die Emissionen aus der Fahrzeugherstellung um bis zu 50 % verringern.
- Den größten Einfluss auf das Ergebnis der BEV haben der direkte Energieverbrauch und die daraus resultierenden indirekten Emissionen der Energiebereitstellung. Aber auch die Lebensdauer des Akkus beeinflusst das Ergebnis stark.
- Bei den fossil betriebenen Pkw bzw. HEV und PHEV haben die direkten Emissionen den größten Anteil an den Gesamtemissionen.

7.2 NO_x-Emissionen

Die Bandbreite des Best- und Worstcase Szenarios zeigt Abbildung 11.

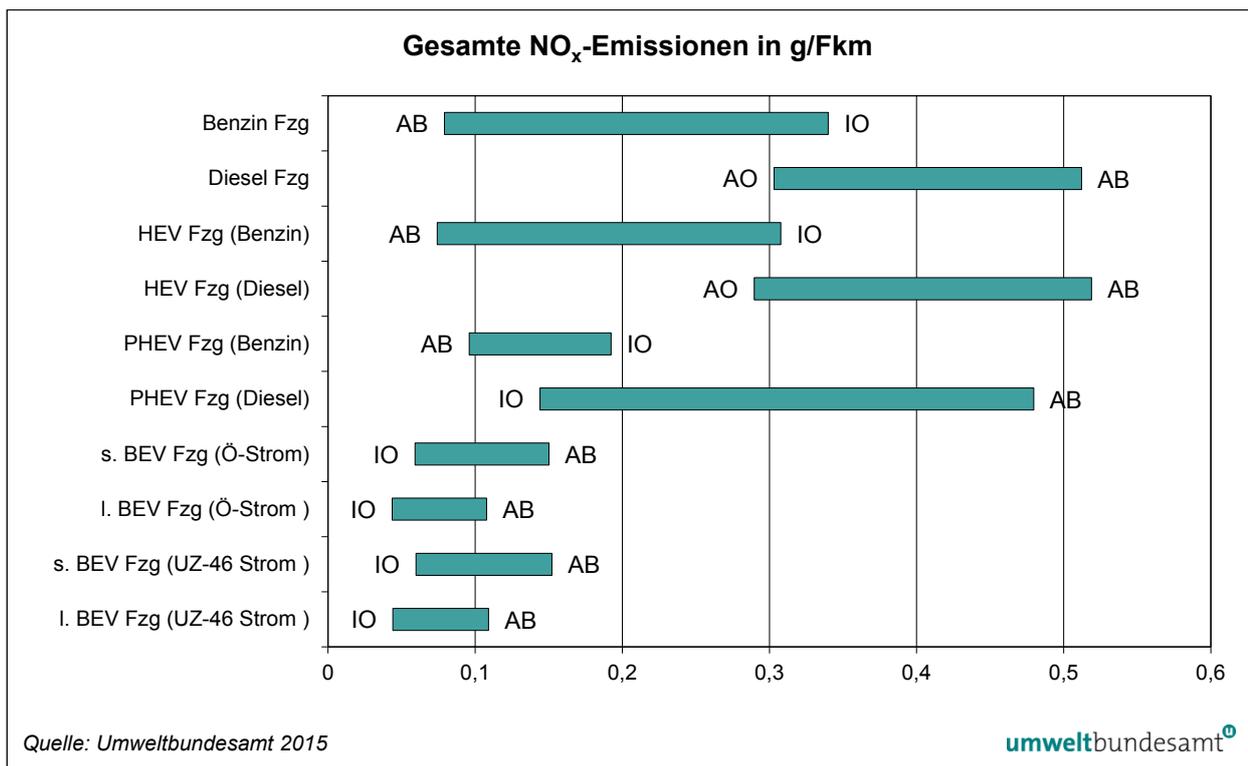


Abbildung 11: Bandbreite der gesamten NO_x Emissionen bei Variation von unterschiedlichen Parametern.

Szenarien Diesel-Fahrzeuge

Für das konventionelle Diesel-Fahrzeug bilden die Fahrsituation außerorts und die Verwendung von Sekundärmaterialien bei der Fahrzeugherstellung das Best-case Szenario. Es ergeben sich dabei rund 0,3 g NO_x-Emissionen pro Fkm. Der Worstcase Fall ist für dieses Fahrzeug die Fahrsituation auf der Autobahn. Gemeinsam mit der Verwendung von Primärrohstoffen ergeben sich NO_x-Emissionen von mehr als 0,5 g pro Fkm.

Die Fahrsituation innerorts bedingt die geringsten Emissionen für das mit Diesel betriebene PHEV von ca. 0,15 g NO_x-Emissionen pro Fkm. In diesem Bestcase Szenario ist auch noch eine Akku-Lebensdauer von 15 Jahren und die Verwendung von Sekundärrohstoffen abgebildet. Für das Worstcase Szenario wird eine Akkulebensdauer von 7,5 Jahren angenommen und die Verwendung von Primärrohstoffen. Zusammen mit der Fahrsituation auf der Autobahn ergeben sich NO_x-Emissionen von rund 0,5 g pro Fkm.

Aussagen, die aus Abbildung 11 abgeleitet werden können und weitere Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse:

Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse

- Diesel-Fahrzeuge haben einen ihrer größten Schwachpunkte bei den gesundheitsschädigenden NO_x-Emissionen. Diese sind bis um den Faktoren 4 größer als bei Benzin betriebenen Pkw.
- Das Plug-In Diesel-Fahrzeug verursacht selbst bei günstigsten Annahmen höhere Emissionen als das BEV.
- Konventionelle bzw. Hybrid Benzin-Fahrzeuge im Bestcase Szenario weisen ähnliche NO_x-Emissionen wie BEV auf, steigen aber beim Worstcase drastisch schlechter aus.
- Ein auf der Autobahn betriebenes Benzin PHEV emittiert ungefähr genauso viele Stickoxide wie ein leichtes BEV. Ein Diesel PHEV emittiert mehr als dreimal so viel wie ein schweres BEV im Worstcase; dies entspricht jeweils dem Betrieb auf der Autobahn.
- Die Verwendung von Sekundärmaterialien kann bis zu 40 % der NO_x-Emissionen bei der Fahrzeugherstellung einsparen.
- Eine Verlängerung der Akkumulator-Lebensdauer auf 15 Jahre verringert die gesamten NO_x-Emissionen von BEV um 8 bis 10 %.
- Plug-In Benzin-Fahrzeuge verursachen geringfügig mehr NO_x-Emissionen als BEV.

7.3 PM-Emissionen

Abbildung 12 zeigt die Bandbreite der PM-Emissionen in Abhängigkeit des Bestcase und Worstcase Szenarios.

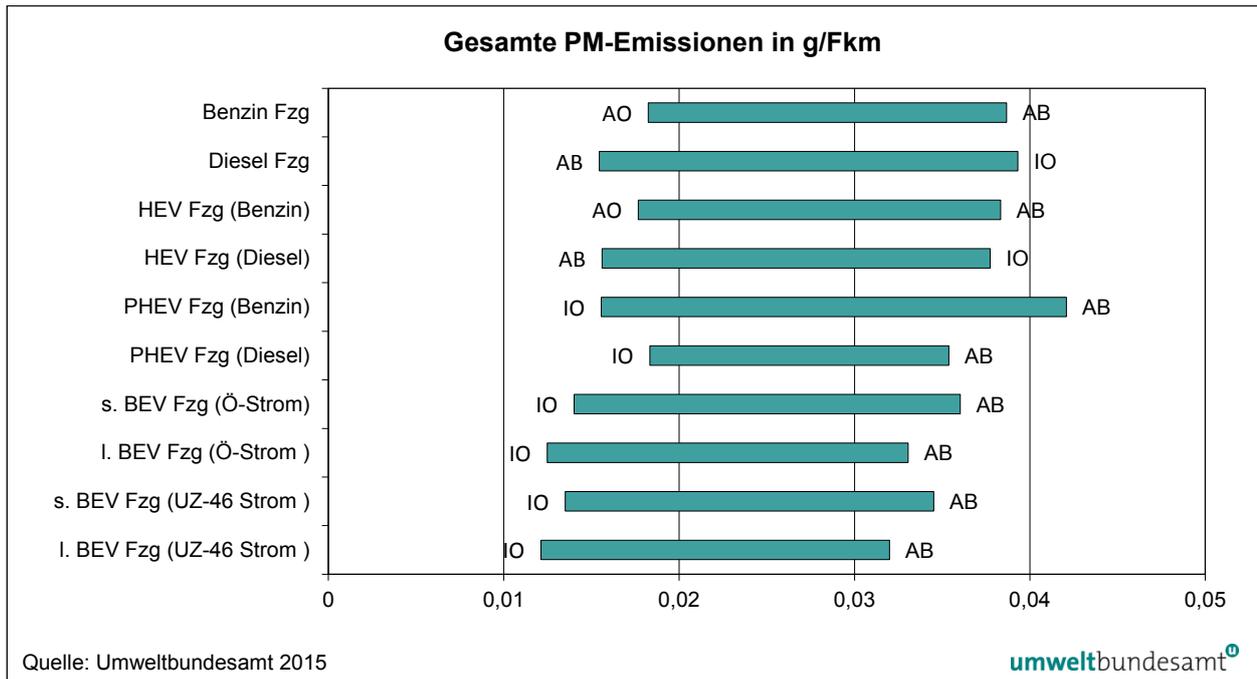


Abbildung 12: Bandbreite der gesamten PM-Emissionen bei Variation von unterschiedlichen Parametern.

Szenarien Hybrid Benzin-Fahrzeug

Die Verwendung von Sekundärmaterialien, eine Akkulebensdauer von 15 Jahren und eine Fahrsituation außerorts stellen das Bestcase Szenario für das Hybrid Benzin-Fahrzeug dar. Umgekehrt bedingen die Fahrsituation Autobahn, eine Akkulebensdauer von 7,5 Jahren und die Verwendung von Primärrohstoffen bei der Fahrzeugherstellung die meisten PM-Emissionen und somit den Worstcase.

Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse

Aussagen, die aus Abbildung 12 abgeleitet werden können und weitere Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse:

- Die Best- bzw. Worstcase Szenarien liegen für alle Fahrzeugtypen ungefähr in der gleichen Größenordnung.
- BEV haben auf Grund der geringen PM-Emissionen bei der Strombereitstellung einen Vorteil.
- Bei der Fahrzeugherstellung können durch den Einsatz von Sekundärmaterialien bis zu 66 % an herstellungsbedingten Emissionen eingespart werden.
- Eine Verdoppelung der Lebensdauer des Li-Ionen Akkumulators kann für BEV zu einer Einsparung bei den gesamten PM-Emissionen von rund 25 % führen.

7.4 Kumulierter Energieaufwand

Abbildung 13 zeigt die Bandbreite der Sensitivitätsanalyse für den KEA.

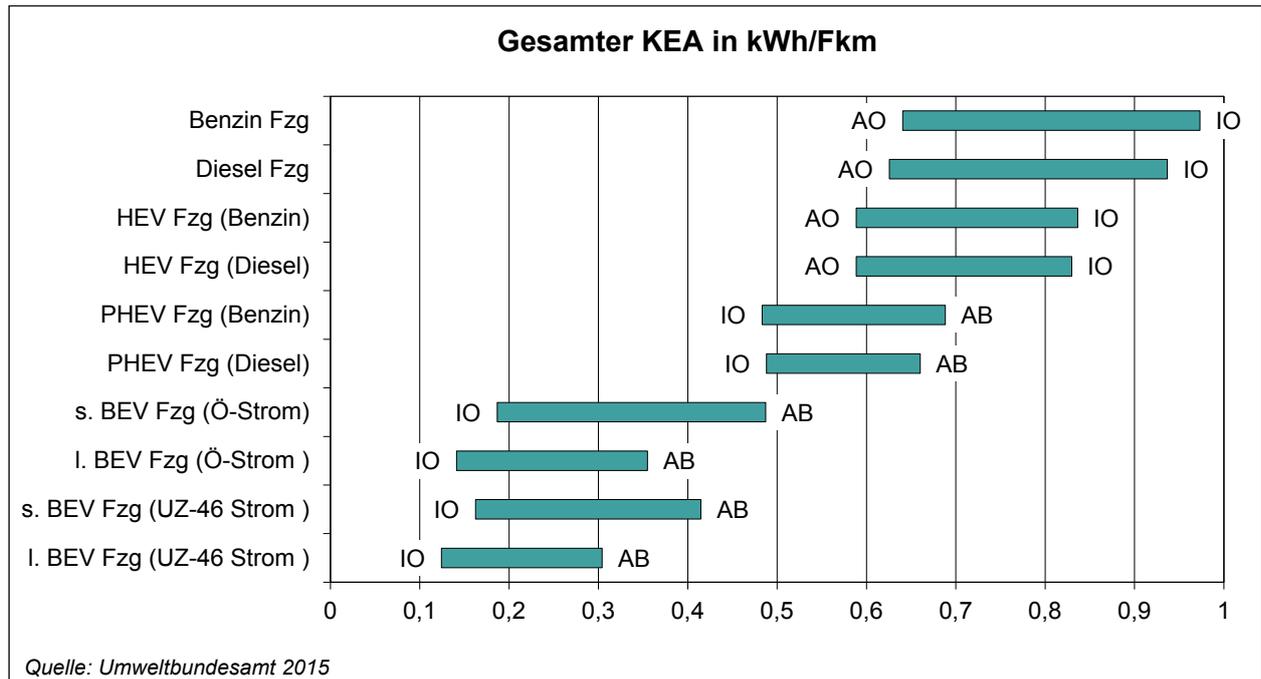


Abbildung 13: Bandbreite des KEA bei Variation von unterschiedlichen Parametern.

Aussagen, die aus Abbildung 13 abgeleitet werden können und weitere Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse:

Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse

- Der Energieaufwand verhält sich ähnlich wie die THG-Emissionen. Dies ist auf den direkten Zusammenhang zwischen KEA und THG-Emissionen zurückzuführen. Demzufolge sind einige der für Abbildung 10 abgeleiteten Aussagen direkt auch für den KEA gültig.
- Durch eine Verlängerung der Lebensdauer können bis zu 17 % des Energieaufwandes bei der Akkumulatorherstellung eingespart werden.
- Für sämtliche BEV ist die Bandbreite des KEA groß. Ein schweres, mit durchschnittlichem österreichischem Strommix betriebenes Elektrofahrzeug auf der Autobahn hat einen ähnlichen kumulierten Energieaufwand wie ein Plug-In Benzin-Fahrzeug bei IO Betrieb.
- Sekundärmaterialien können den Energieaufwand für die Fahrzeugherstellung um 25 % bis 40 % senken.
- Das Einsatzgebiet eines BEV sollte möglichst auf den innerstädtischen Betrieb beschränkt sein.
- Zwischen Bestcase Szenario für das leichte BEV und Worstcase Szenario für das Benzin-Fahrzeug liegt ein Faktor von acht; demzufolge benötigen, unter Berücksichtigung des gesamten Lebenszyklus, acht leichte BEV (betrieben mit UZ 46 Strom) im innerstädtischen Betrieb genausoviel Energie wie ein konventionell betriebenes Benzin-Fahrzeug.

8 WASSERSTOFF-BRENNSTOFFZELLENFAHRZEUG

An dieser Stelle wird auf Grundlage der Studie Ökobilanz alternativer Antriebe. Elektrofahrzeuge im Vergleich. (UMWELTBUNDESAMT 2014) das Wasserstoffauto (H₂ Brennstoffzellen-Fahrzeug) vorgestellt:

Auch Wasserstoff kann als alternativer Treibstoff eingesetzt werden. In ihrer Funktionsweise sind H₂ Brennstoffzellen-Fahrzeuge (H₂-BZEV) den Elektrofahrzeugen sehr ähnlich. Anstelle von Strom dient Wasserstoff als Energieträger. In der Brennstoffzelle wird aus der Reaktion von Wasserstoff mit Sauerstoff elektrische Energie gewonnen, die dann in einem Akkumulator zwischengespeichert wird.

Herstellungsarten von Wasserstoff

Es gibt unterschiedliche Herstellungsarten von Wasserstoff, wobei die bekannteste die Elektrolyse ist. Dazu werden lediglich Wasser und Strom benötigt. Eine andere Herstellungsart ist das Reforming. Dazu werden wasserstoffhaltige Rohstoffe wie z. B. Methan (CH₄) benötigt. Die für diesen Prozess benötigte Energie wird durch die verwendeten Rohstoffe bereitgestellt.

Die Ergebnisse der Studie Ökobilanz alternativer Antriebe. Elektrofahrzeuge im Vergleich. (UMWELTBUNDESAMT 2014)¹⁷ werden in Tabelle 12 dargestellt.

Es ist allerdings zu beachten, dass diese Ergebnisse auf Grund unterschiedlicher Systemgrenzen **nicht** unmittelbar mit jenen der vorliegenden Studie vergleichbar sind. Die Auflistung soll die Größenordnung der Emissionen bzw. des KEA darstellen.

Tabelle 12:
Gesamtergebnisse
(Fahrzeugherstellung
und Energiebereit-
stellung) für das
H₂ Brennstoffzellen-
Fahrzeug (Quelle: UM-
WELTBUNDESAMT 2014).

	THG [g CO ₂ -eq/Fkm]	NO _x [g/Fkm]	PM [g/Fkm]	KEA [kWh/Fkm]
H ₂ -BZEV (UZ 46 Strom)	54,42	0,28	0,06	0,779
H ₂ -BZEV (ö. Strom)	126,89	0,34	0,07	0,919
H ₂ -BZEV (Reforming)	102,97	0,14	0,06	0,746

¹⁷ Anmerkung: Wasserstoff kann neben dem Einsatz in einem Brennstoffzellen-Fahrzeug auch als direkte Energiequelle verwendet werden. Dazu wird Wasserstoff ähnlich wie Benzin/Diesel als Treibstoff mitgeführt und über einen Verbrennungsprozess die benötigte Antriebsenergie gewonnen. In der Studie Ökobilanz alternativer Antriebe. Elektrofahrzeuge im Vergleich. (UMWELTBUNDESAMT 2014) hat diese Art der Technologie bei Betrachtung der THG- und NO_x-Emissionen bzw. des KEA äußerst schlecht abgeschnitten und wird somit in dieser Studie nicht mehr dargestellt.

9 SCHLUSSFOLGERUNGEN

Die vorliegende Studie verdeutlicht, dass Aussagen über umweltrelevante Effekte verschiedener Pkw-Antriebsarten nur durch eine gesamtheitliche Betrachtung im Rahmen einer Ökobilanz zulässig sind. Ohne umfassende Betrachtung des gesamten Lebenszyklus eines Fahrzeugs kommt es zu keiner vollständigen Darstellung der Umwelteffekte von Transportsystemen.

Die Ergebnisse dieser Studie zeigen die umweltrelevanten Vorteile von Batterie-Elektrofahrzeugen in Bezug auf Treibhausgas- und Luftschadstoffemissionen bzw. kumuliertem Energieaufwand. Auch der elektrische Hilfsantrieb, der bei Hybrid- bzw. Plug-In Hybrid-Elektrofahrzeugen implementiert ist, verringert die negativen Umwelteffekte in Vergleich zu konventionell mittels Benzin/Diesel betriebenen Fahrzeugen.

Im Vergleich zu konventionell betriebenen Diesel- bzw. Benzin-Fahrzeugen verursachen BEV weniger THG-Emissionen. Die Differenz liegt zwischen Faktor 4 bis 10 je Fkm bzw. zwischen 75 und 90 %. Auch bei den NO_x- und PM-Emissionen ergeben sich zum Teil deutlich geringere Emissionen für BEV.

Im Vergleich zu HEV verursachen BEV um 75 bis 90 % weniger THG-Emissionen und einen um 50 % bis 70 % geringeren KEA.

BEV weisen außerdem um 65 bis 85 % weniger THG-Emissionen auf als PHEV.

BEV haben den Vorteil, dass im Betrieb keine direkten Emissionen anfallen, was sich lokal besonders positiv auswirkt, da keine gesundheitsschädlichen Luftschadstoffe emittiert werden. Diese Antriebsart bilanziert auch bei Betrachtung sämtlicher vorgelagerter Emissionen und Energieeinsätze deutlich besser als andere Antriebsarten.

Ein spezielles Ergebnis dieser Studie liefert die Sensitivitätsanalyse der unterschiedlichen Fahrsituationen. Es zeigt sich sehr deutlich, dass es einen großen Unterschied macht, wie und wo ein Fahrzeug eingesetzt wird. So ist für BEV die Fahrsituation innerorts mit den geringsten umweltrelevanten Effekten verbunden, weil hier der Rekuperationsmechanismus gut angewendet werden kann und weil bei niedrigen Geschwindigkeiten der Akkumulator nicht so stark belastet wird. Für, mit fossilen Kraftstoffen betriebene Fahrzeuge bzw. HEV und PHEV, lässt sich keine allgemeine Aussage herleiten welche Fahrsituation mit den geringsten Umwelteffekten behaftet ist. Eine Ausnahme stellt das Diesel-PHEV dar. Auch hier ist die Fahrsituation innerorts mit den geringsten Treibhausgas- und Luftschadstoffemissionen behaftet.

Der Akku hat einen wesentlichen Einfluss auf das Ergebnis der BEV. Hier zeigt die Sensitivitätsanalyse, dass die Lebensdauer des Li-Ionen Akkumulators das Ergebnis maßgeblich beeinflusst. Bezüglich Energieinhalt, Lebensdauer und Reichweite von Akkumulatoren gibt es seit einigen Jahren eine Vielzahl an Innovationen; sie beeinflussen die Performance der Systeme positiv. Dies führt auch zu einer weiteren Verbesserung der umweltrelevanten Auswirkungen von BEV. Die genauen Auswirkungen dieser Entwicklungen sind Teil der aktuellen Forschung.

Der Unterschied in den Ergebnissen für leichte bzw. schwere BEV ist relativ groß, mit klarerem Vorteil für leichte BEV. Auch hier ist absehbar, dass durch neue Konzepte und Innovationen das Gewicht der Fahrzeuge bei steigender Funktionalität kontinuierlich reduziert wird, z. B. durch den Einsatz neuer Materialien und Leichtbauweise.

**Vorteile von
Batterie-
Elektrofahrzeugen**

**geringste
Umwelteffekte für
BEV innerorts**

**Akku-Lebensdauer
bei BEV**

**leichte und schwere
BEV**

UZ 46 Strom Durch die Energieversorgung der BEV mit UZ 46 Strom werden die Treibhausgas- und Luftschadstoffemissionen bzw. der kumulierte Energieaufwand weiter reduziert, sodass der Ausbau dieser regenerativen Energieträger weiter forciert werden sollte. Inwieweit eine starke Marktdurchdringung von BEV Auswirkungen auf die Stromversorgung hat bzw. ob der zusätzliche Strombedarf mit erneuerbaren Energieträgern bereitgestellt werden kann, muss genauer erforscht und analysiert werden. Dabei muss die Stromversorgung im europäischen Kontext berücksichtigt werden, da eine nationalstaatliche Betrachtung zu kurz greift (internationaler Verkehr, Stromimporte und -exporte etc.).

Fahrzeugherstellung Eine weitere, wesentliche Einflussgröße auf das Ergebnis ist die Fahrzeugherstellung. Hier zeigt sich, dass die Verwendung von Sekundärmaterialien große umweltrelevante Vorteile bringt. In der Fahrzeugherstellung steckt ein großes Innovationspotential, nicht nur bei der Verwendung von Sekundär- bzw. Substitutionsmaterialien, sondern auch im Bereich neuer Materialien, die in der Leichtbauweise eingesetzt werden.

Erweiterung der Umweltindikatoren

Viele der angesprochenen neuen Entwicklungen (Leichtbauweise, neue Akkus etc.) können in der Gesamtheit der ökologischen Auswirkungen nicht alleine mit den, in dieser Studie verwendeten, ökologischen Indikatoren erfasst werden. Eine Erweiterung dieser Umweltindikatoren auf andere Emissionen in Wasser, Boden und Luft ist bei zukünftigen Berechnungen erforderlich. Bei einer Ausweitung der Ökobilanz können beispielsweise die Indikatoren Versauerung, Eutrophierung oder die fotochemische Bildung von Ozon erhoben werden. Weiters kann in zukünftigen Berechnungen auch der Landverbrauch bzw. Wasserverbrauch berücksichtigt werden. Neue Entwicklungen im Bereich der sozialen Ökobilanz versuchen auch soziale Indikatoren (z. B. Arbeitsplätze, faire Bezahlung, Gewerkschaften etc.) zu erheben. Die schnelle Entwicklung bei der Innovation neuer Materialien und Fahrzeuge sowie im Bereich von Ökobilanzen machen zukünftige Neuberechnungen der ökologischen Auswirkungen unterschiedlicher Fahrzeuge notwendig.

10 LITERATURVERZEICHNIS

- ALTAUS, H.-JÖRG & BAUER, C. (2011): Gegenüberstellung verschiedener aktueller Schweizer Ökobilanzstudien im Bereich Elektromobilität. Schlussbericht, Villigen und Dübendorf.
- ALTAUS, H. & GAUCH, M. (2010): Vergleichende Ökobilanz individueller Mobilität: Elektromobilität versus konventionelle Mobilität mit Bio- und fossilen Treibstoffen. Life Cycle Assessment and Modelling Group, Technologie und Gesellschaft, Empa, Dübendorf.
- DUNN, J.B.; GAINES, L.; BARNES, M.; SULLIVAN, J.; WANG, M. (2012): Material and Energy Flows in the Materials Production, Assembly, and End-of-Life Stages of the Automotive Lithium-Ion Battery Life Cycle. Argonne National Laboratory, Argonne.
- EU Altfahrzeuge-Richtlinie 2015 (RL 2000/53/EG): Richtlinie des Europäischen Parlaments und des Rates vom 18. September 2000 über Altfahrzeuge; ABl. Nr. L 269 vom 21/10/2000 S. 0034 - 0043
- HAUSBERGER, S. (2008): Aktualisierung der Emissionsdaten und Modellberechnungen zum Verkehr in Österreich, 2005-Trends und Ausblick bis 2030. Erstellt im Auftrag des Bundesministeriums für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft, TU Graz, Institut für Verbrennungskraftmaschinen und Thermodynamik, Graz.
- HAWKINS, T. R.; SINGH, B.; MAJEAU-BETTEZ, G. & STRØMMAN, A. H. (2013): Comparative Environmental Life Cycle Assessment of Conventional and Electric Vehicles. Journal of Industrial Ecology, 17: 53–64. doi: 10.1111/j.1530-9290.2012.00532.x
- MAUR, A. A. D.; TREIBER, M.; LÄMMER, S. (2012): Kombinierte Lebenszyklus- und Verflechtungsanalyse zur Bilanzierung der CO₂-Emissionen von Elektrofahrzeugen. 23. Verkehrswissenschaftliche Tage 2012 „Herausforderung Elektromobilität“. Fakultät Verkehrswissenschaften „Friedrich List“, TU Dresden, Dresden.
- MESSAGIE, M.; BOUREIMA, F.-S.; COOSEMANS, T.; MACHARIS, C. & Mierlo, J.V. (2014): A Range-Based Vehicle Life Cycle Assessment Incorporating Variability in the Environmental Assessment of Different Vehicle Technologies and Fuels. Energies. 2014; 7(3):1467-1482,
- STATISTIK AUSTRIA (2014a): Kraftfahrzeuge-Bestand. 17.12.2014.
www.statistik.at/web_de/statistiken/verkehr/strasse/kraftfahrzeuge_-_bestand/index.html.
- STATISTIK AUSTRIA (2014b): Kraftfahrzeug-Bestand am 31. Dezember 2014. 06.02.2015.
http://www.statistik.at/web_de/statistiken/verkehr/strasse/kraftfahrzeuge_-_bestand/
- THIELMANN, A.; SAUER, A.; ISENMANN, R.; WIETSCHEL, M. & PLÖTZ, P. (2012): Produkt-Roadmap: Lithium-Ionen-Batterien 2030, Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI. Nr. 4/ 1. Auflage. ISSN 2192-3981. Karlsruhe.
- UMWELTBUNDESAMT (2014): Winter, R.; Pötscher, F.; Pölz, W. et al: Ökobilanz alternativer Antriebe. Elektrofahrzeuge im Vergleich. Umweltbundesamt, Wien.

UMWELTZEICHEN (2013): Österreichisches Umweltzeichen, Richtlinie UZ 46. Grüner Strom. Version 4.1. www.umweltzeichen.at/cms/de/produkte/gruene-energie/content.html?rl=32

WHO (2015): WHO Regional Office for Europe, OECD (2015). Economic cost of the health impact of air pollution in Europe. Clean air, health and wealth. WHO Regional Office for Europe, Copenhagen.

11 ABKÜRZUNGEN

AB.....	Autobahn
AO	außerorts (Land- bzw. Schnellstraße ohne Autobahn)
BEV	rein mittels Akkumulator betriebenes Elektrofahrzeug (Battery Electric Vehicle)
BZEV	Brennstoffzellen-Elektrofahrzeug
CNG	compressed natural gas
CO ₂ -eq	Kohlenstoffdioxid-Äquivalente
E-Fahrzeuge.....	Elektrofahrzeuge
EoL-Prozess	End-of-Life-Prozess (beinhaltet Recycling und Entsorgung der Fahrzeuge)
EPDM	Ethylen-Propylen-Dien-Kautschuk
Fkm	Fahrzeugkilometer
GEMIS	Globales-Emissions-Modell-Integrierter-Systeme
HBEFA	Handbuch Emissionsfaktoren
HEV	Hybrid-Elektrofahrzeug
IO.....	innerorts
KEA	kumulierte Energieaufwand
VKM.....	Verbrennungskraftmaschine
kWh	Kilo Watt Stunde
KWK	Kraft-Wärme-Kopplung
I. BEV	leichtes BEV
LDPE	Low density Polyethylen
Li-Ionen	Lithium-Ionen
Mn ₂ O ₃	Mangan(III)-oxid
NEMO.....	Network Emission Model
NO _x	Stickoxide
PET	Polyethylenterephthalat
PHEV.....	Plug-In Hybrid-Elektrofahrzeug
PM	Feinstaub (Particulate Matter) ≤ 10 µm;
PP.....	Polypropylen
SUV	Sport Utility Vehicle
s. BEV	schweres BEV
THG	Treibhausgas
UZ 46.....	Umweltzeichen 46
WHO	World Health Organisation

ANHANG – Ergebnistabelle

Tabelle 13: Ergebnistabelle Gesamt- Auswertung nach Fahrzeugkilometern. (Quelle: Umweltbundesamt 2015).

Fahrzeug	THG-Emissionen						NO _x -Emissionen						PM-Emissionen						Kumulierter Energieaufwand						Batteriegewicht [kg]
	g/Fahrzeugkilometer						g/Fahrzeugkilometer						g/Fahrzeugkilometer						kWh/Fahrzeugkilometer						
	Fahrbetrieb	Fahrzeuherstellung	Akkumulatorherstellung	Energiebereitstellung	Entsorgung	Gesamt	Fahrbetrieb	Fahrzeuherstellung	Akkumulatorherstellung	Energiebereitstellung	Entsorgung	Gesamt	Fahrbetrieb	Fahrzeuherstellung	Akkumulatorherstellung	Energiebereitstellung	Entsorgung	Gesamt	Fahrbetrieb	Fahrzeuherstellung	Akkumulatorherstellung	Energiebereitstellung	Entsorgung	Gesamt	Batteriegewicht [kg]
Benzin Fzg	151,2	13,4	0	37,4	0,2	202,2	0,031	0,035	0	0,095	0	0,162	0,002	0,011	0	0,012	0,001	0,026	0,57	0,054	0	0,145	0,001	0,77	-
Diesel Fzg	151,4	13,4	0	27,5	0,2	192,5	0,274	0,035	0	0,077	0	0,385	0,002	0,011	0	0,01	0,001	0,023	0,61	0,054	0	0,076	0,001	0,741	-
HEV Fzg (Benzin)	138,5	12,2	0,8	34,1	0,2	185,8	0,029	0,028	0,002	0,087	0	0,146	0,002	0,01	0,002	0,011	0,001	0,025	0,52	0,049	0,004	0,133	0,001	0,707	25
HEV Fzg (Diesel)	141,4	12,2	0,8	24,3	0,2	178,8	0,267	0,028	0,002	0,072	0	0,37	0,002	0,01	0,002	0,009	0,001	0,023	0,57	0,049	0,004	0,071	0,001	0,695	25
PHEV Fzg (Benzin)	89,9	12,3	4	32,6	0,3	139,1	0,014	0,029	0,012	0,075	0	0,13	0,001	0,01	0,007	0,008	0,001	0,028	0,407	0,05	0,018	0,108	0,001	0,584	120
PHEV Fzg (Diesel)	92,3	12,3	4	27,3	0,3	136,2	0,193	0,029	0,012	0,067	0	0,301	0,001	0,01	0,007	0,007	0,001	0,027	0,445	0,05	0,018	0,07	0,001	0,584	120
s. BEV Fzg (Ö-Strom)	-	13,5	5,6	30,2	0,3	49,6	-	0,035	0,016	0,052	0	0,104	-	0,011	0,01	0,003	0,001	0,025	0,2	0,054	0,027	0,056	0,002	0,339	200
s. BEV Fzg (UZ 46 Strom)	-	13,5	5,6	4,4	0,3	23,8	-	0,035	0,016	0,053	0	0,105	-	0,011	0,01	0,002	0,001	0,024	0,2	0,054	0,027	0,008	0,002	0,291	200
I. BEV Fzg (Ö-Strom)	-	11	4,9	21,2	0,3	37,3	-	0,022	0,014	0,037	0	0,073	-	0,011	0,009	0,002	0	0,023	0,14	0,046	0,024	0,039	0,001	0,251	175
I. BEV Fzg (UZ 46 Strom)	-	11	4,9	3,1	0,3	19,2	-	0,022	0,014	0,037	0	0,074	-	0,011	0,009	0,002	0	0,022	0,14	0,046	0,024	0,006	0,001	0,217	175

Umweltbundesamt GmbH

Spittelauer Lände 5
1090 Wien/Österreich

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

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

office@umweltbundesamt.at

www.umweltbundesamt.at

Der vorliegende Report untersucht Treibhausgas- und Luftschadstoffemissionen sowie den kumulierten Energieaufwand über den gesamten Lebenszyklus unterschiedlicher elektrischer Pkw-Antriebssysteme im Vergleich zu konventionellen Antriebsformen.

Nur eine gesamtheitliche Betrachtung von umweltrelevanten Indikatoren ermöglicht Aussagen über die Umwelteffekte der unterschiedlichen Antriebssysteme.

Rein elektrisch betriebene Pkw schneiden hinsichtlich der betrachteten Umweltindikatoren signifikant besser ab als konventionell betriebene Diesel-/Benzin-Fahrzeuge. Der zusätzliche elektrische Antrieb bei Hybrid- bzw. Plug In Hybrid-Fahrzeugen bewirkt eine umweltrelevante Verbesserung. Mit erneuerbaren Strom als Energiequelle lassen sich diese Effekte noch bedeutend steigern.