

Dipl.–Geogr. Philipp Wellbrock

Dipl.–Ing. Max Fette

Dr. Jürgen Gabriel

Karen Janßen M.A.

Bewertung der CO₂–Emissionen von Elektrofahrzeugen – Stand der wissen- schaftlichen Debatte

**Bericht im Rahmen der Begleitforschung zur
Modellregion Elektromobilität Bremen/Oldenburg**

Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde mit Mitteln
des Bundesministeriums für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung
unter dem Förderkennzeichen 03KP544F gefördert.

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt
bei den Autoren.



Gefördert durch:



Koordiniert durch:



Autoren:

Bremer Energie Institut

Dipl.–Geogr. Philipp Wellbrock

Dipl.–Ing. Max Fette

Dr. Jürgen Gabriel

Karen Janßen M.A.

Ansprechpartner:

Dr. Jürgen Gabriel

Bremer Energie Institut

College Ring 2 / Research V

28759 Bremen

Tel.: +49 (0) 421 / 200 – 4882

Fax: +49 (0) 421 / 200 – 4877

Email: gabriel@bremer-energie-institut.de

www.bremer-energie-institut.de

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	6
Tabellenverzeichnis.....	7
Abkürzungsverzeichnis	8
Zusammenfassung	9
1 Einführung	11
1.1 Abgrenzung und Definitionen	12
1.2 Liste der untersuchten Studien.....	13
2 Parameter des Emissionsvergleichs	15
2.1 Überblick.....	15
2.2 Emissionen der Verbrennungsfahrzeuge (CV).....	16
2.3 Verbrauch der Elektrofahrzeuge (BEV)	19
2.4 Emissionen der Stromerzeugung.....	22
3 Synthese und Ausblick.....	24
3.1 Entwicklung von Korridoren	24
3.2 Resultate der untersuchten Studien.....	26
3.3 Prognose bis 2030	27
4 Nutzung von zusätzlichem Ökostrom.....	29
5 Alternative Betrachtungsweisen der Emissionseffekte.....	31
5.1 Wechselwirkung mit Flottenobergrenzen.....	31
5.2 Wechselwirkung mit Emissionshandelssystem.....	31
6 Verortung der Ergebnisse der Modellregion	33
6.1 Zielsetzung	33
6.2 Datenbasis	33
6.3 Ansatz und Methodik	34
6.4 Ergebnisse.....	35
6.5 Verortung der Ergebnisse in den untersuchten Studien.....	37
7 Fazit.....	38
Literatur.....	39
Anhang: Übersicht über die untersuchten Studien	43

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2-1: Parameter des Emissionsvergleichs	15
Abbildung 2-2: WtW-Emissionen von Klein(st)-CV gemäß der untersuchten Studien ..	18
Abbildung 2-3: WtW-Emissionen von Kompakt-CV gemäß der untersuchten Studien.	19
Abbildung 2-4: Stromverbrauch von Klein(st)-BEV gemäß der untersuchten Studien ..	21
Abbildung 2-5: Stromverbrauch von Kompakt-BEV gemäß der untersuchten Studien.	21
Abbildung 3-1: WtW-Emissionskorridore für CV und BEV – Klein(st)wagen	25
Abbildung 3-2: WtW-Emissionskorridore für CV und BEV – Kompaktklasse	25
Abbildung 3-3: Prognose der Emissionen von BEV und CV (WtW) bis 2030	28
Abbildung 6-1: Beispielhafte Übersicht über auswertbare Daten für ein Elektrofahrzeug	35

Tabellenverzeichnis

Tabelle 3-1: Ergebnisse der untersuchten Studien zur Emissionsbilanz von BEV..... 26

Tabelle 6-1: Durchschnittliche Verbräuche in kWh/100 km für Fahrzeugtyp A..... 36

Tabelle 6-2: Durchschnittliche Verbräuche in kWh/100 km für Fahrzeugtyp B 37

Abkürzungsverzeichnis

BEV	Batterie-elektrisches Fahrzeug (von engl. <i>battery electric vehicle</i>)
CV	Verbrennungsfahrzeug (von engl. <i>combustion vehicle</i>)
EE	Erneuerbare Energien
EEG	Erneuerbare-Energien-Gesetz
EU ETS	Europäischer Emissionshandel (von engl. <i>European Union emission trading system</i>)
EU	Europäische Union
KWK	Kraft-Wärme-Kopplung
LCA	Lebenszyklusanalyse (von engl. <i>life cycle assessment</i>)
Li-Io	Lithium-Ionen-Technologie
NEFZ	Neuer Europäischer Fahrzyklus
THG	Treibhausgase
TtW	<i>Tank-to-Wheel</i>
WtT	<i>Well-to-Tank</i>
WtW	<i>Well-to-Wheel</i>

Zusammenfassung

In der wissenschaftlichen Debatte ist es anerkannt, dass Elektrofahrzeuge nicht per se als "emissionsfrei" angesehen werden können, nur weil sie während des Betriebs keine Treibhausgase ausstoßen. Analog zu einer Betrachtung „von der Ölquelle bis zum Rad“ (Well-to-Wheel) in einem Verbrennungsfahrzeug müssen die energetischen Vor-ketten, also die Erzeugung des Ladestroms, einbezogen werden, wenn der tatsächliche Klimaeffekt von Elektrofahrzeugen untersucht werden soll. Für den Vergleich der THG-Emissionen beider Fahrzeugarten pro Fahrkilometer sind demnach verschiedene Pa-rameter zu berücksichtigen:

- Emissionen von Verbrennungsfahrzeug beim Betrieb (Tank-to-Wheel) und in der Kraftstoffherstellung (Well-to-Tank)
- Stromverbrauch der Elektrofahrzeuge im Betrieb und Emissionen bei der Erzeu-gung des Ladestroms
- Fahrprofile (Streckenanteile innerorts/außerorts/Autobahn)

Zur Eingrenzung dieser Parameter wurden acht seit 2007 in Deutschland erschienene Studien untersucht, die einen Emissionsvergleich von PKW mit herkömmlichem Ver-brennungsmotor und batterie-elektrischem Antrieb anstellen. Dabei wurde offenbar, dass besonders die drei für den Betrieb geltenden Parameter beträchtliche Bandbreiten aufweisen:

- Große Abweichungen bei den Tank-to-Wheel-Emissionen der Verbrennungs-fahrzeuge treten auf, je nachdem ob Normangaben der Hersteller oder Werte aus Praxistests verwendet werden.
- Die Problematik zusätzlicher Stromverbraucher an Bord von Elektrofahrzeugen wird nicht in allen Studien ausreichend behandelt, obwohl diese großen Einfluss auf den Stromverbrauch haben können.
- Die Wahl der Fahrprofile beeinflusst den Vergleich stark, da die beiden Fahr-zeugarten in unterschiedlichen Fahrsituationen ihr Effizienzmaximum erreichen.

Ergebnisse der untersuchten Studien

Bei Annahme des deutschen Strommix wird von allen untersuchten Studien ein gewis-ser Emissionsvorteil für Elektrofahrzeuge festgestellt. Die Bandbreite der Resultate ist mit Vorteilen von 3% bis zu über 50% allerdings sehr groß; andererseits liegen vier der Studien mit Ergebnissen von 20–30% relativ dicht beieinander.

Alternative Betrachtungsweisen

Mehrere Autoren melden Zweifel an, den durchschnittlichen Strommix als Bemessungsgrundlage für die CO₂-Intensität des Ladestroms zu verwenden: Die entstehende zusätzliche Stromnachfrage werde tatsächlich durch dasjenige Kraftwerk gedeckt, das im entsprechenden Zeitraum die niedrigsten Grenzkosten aufweise. Dies sind tagsüber oft Spitzenlastkraftwerke wie etwa Gaskraftwerke, nachts aber in der Regel Steinkohlekraftwerke. Deshalb sei ein höherer Emissionsfaktor anzusetzen, der durchaus zu gleichen oder sogar höheren Emissionen von Elektrofahrzeugen gegenüber Verbrennungsfahrzeugen führen kann.

Auch für den vermeintlichen Ausweg aus dieser Problematik, der Ladung mit Ökostrom, ergeben sich Fallstricke durch den regulatorischen Rahmen im Stromsektor: Werden bestehende Ökostromkapazitäten einfach nur umgewidmet oder herkömmlicher Strom durch Zertifikate ausländischer Wasserkraftwerke „vergrünt“, so wird de facto kein zusätzlicher Ökostrom produziert.

Deswegen müssten neue EE-Kapazitäten in Höhe des zusätzlichen Stromverbrauchs geschaffen werden, deren Produktion dürfte zudem nicht nach EEG vergütet werden dürfte. Auch der Bezug von zertifizierten Ökostromprodukten sichert eine gewisse zusätzliche EE-Produktion, da sich die Anbieter verpflichten, neue Kapazitäten zu schaffen und außerhalb des EEG zu betreiben. Ein dritter Weg, um klimaneutrale Elektromobilität sicherzustellen, führt über die nationalen Ausbauziele für erneuerbare Energien – würden diese um die Strommenge angehoben, die für Elektrofahrzeuge benötigt wird, könnte über Instrumente wie das EEG die zusätzliche Produktion erreicht werden.

Weitere Wechselwirkungen der Elektromobilität mit den regulatorischen Rahmenbedingungen im Strom- und Verkehrssektor machen eine Bewertung der Emissionseffekte sehr komplex: So könnte eine konsequente Fortsetzung des europäischen Emissionshandels dafür sorgen, dass der zusätzliche Strombedarf für Elektrofahrzeuge zwingend an anderer Stelle eingespart werden müsste. Gegensätzliche Effekte könnten wiederum durch die EU-Regelung zu verbindlichen Flottenobergrenzen entstehen, da hier Elektrofahrzeuge unabhängig von ihrem tatsächlichen THG-Ausstoß als emissionsneutral bewertet werden.

So ist nicht zuletzt die Politik gefordert, die technische Entwicklung der Elektromobilität durch die Schaffung eines geeigneten rechtlichen Rahmens zu begleiten.

1 Einführung

Ein häufiges Argument in der Diskussion über Elektrofahrzeuge ist, dass ihre Verbreitung erheblich zu reduzieren Treibhausgas (THG)–Emissionen im Verkehrssektor beiträgt. In der wissenschaftlichen Debatte ist es allerdings anerkannt, dass Elektrofahrzeuge nicht per se als "emissionsfrei" angesehen werden können, nur weil sie während des Betriebs keine klimaschädlichen Stoffe ausstoßen.

In den letzten Jahren wurden vermehrt Versuche unternommen, die Klimaauswirkungen eines Ersatzes herkömmlicher Verbrennungsfahrzeugs durch batterie–elektrische Fahrzeuge zu quantifizieren und zu bewerten. Ziel dieses Berichts ist es, einen Überblick über die methodischen Grundlagen eines solchen Emissionsvergleichs zu geben und den aktuellen Stand der Forschung in Deutschland anhand einer Reihe neuerer Studien darzustellen.

In einem ersten Schritt werden die notwendigen Eingangsparameter eines Emissionsvergleichs erläutert und die von den untersuchten Studien getroffenen Annahmen dargestellt. In einer darauf folgenden Synthese werden hieraus Korridore gebildet, die die Bandbreite der möglichen Resultate verdeutlichen und mit den tatsächlichen Ergebnissen der Studien abgleichen. Ferner wird aus den in einigen Studien enthaltenen Prognosen ein Ausblick auf die Entwicklung bis 2030 gegeben.

In Kapitel 4 werden die Optionen diskutiert, wie (fast) emissionsfreie Elektromobilität durch den Einsatz von zusätzlichen erneuerbaren Energien erreicht werden kann.

Im letzten Kapitel kommen alternative Betrachtungsweisen der Emissionseffekte zur Sprache, die von einigen der untersuchten Studien ebenfalls thematisiert werden. Diese zielen auf die komplexen Wechselwirkungen mit den regulatorischen Rahmenbedingungen im Strom– und Verkehrssektor ab, welche sich beim Einsatz von Elektrofahrzeugen ergeben und zu höchst unterschiedlichen Bewertungen der Emissionseffekte führen können.

1.1 Abgrenzung und Definitionen

Der vorliegende Bericht beschränkt sich auf Emissionsvergleiche zwischen

1. batterie-elektrischen PKW, kurz „Elektrofahrzeug“ oder BEV (von engl. *battery electric vehicle*), und
2. vergleichbaren PKW mit konventionellem Verbrennungsmotor, kurz: „Verbrennungsfahrzeug“ oder CV (von engl. *combustion vehicle*).

Wasserstoff- und Hybrid-PKW sowie Nutzfahrzeuge und Zweiräder werden nicht betrachtet.

Behandelt werden ausschließlich Emissionen von **Treibhausgasen**¹, nicht dagegen Emissionen von nicht klimaschädigenden Stoffen² oder Geräuschemissionen. Des Weiteren werden nur jene Emissionen betrachtet, die durch den **Betrieb** des Fahrzeugs entstehen, inklusive der Vorketten der eingesetzten Energieträger. Emissionen, die während des Baus, der Auslieferung, der Wartung oder der Entsorgung des Fahrzeugs entstehen, werden nicht berücksichtigt – eine solche Lebenszyklusanalyse (engl. *life cycle assessment*, LCA) wird nur von drei der verglichenen Studien angestellt, außerdem würde die komplexe Methodik Rahmen und Zielsetzung dieses Berichts überschreiten.

Der Bericht bezieht sich auf die Ebene des **einzelnen Fahrzeugs**, analysiert also Untersuchungen, welche Auswirkungen der Einsatz eines Elektrofahrzeugs anstelle eines Verbrennungsfahrzeugs hätte. Potentialanalysen, die den kumulierten Gesamteffekt einer gewissen Verbreitung von Elektrofahrzeugen abschätzt, werden in diesem Bericht nicht untersucht. Aufgrund ihrer weitreichenden Implikationen werden in diesem Bericht jedoch auch alternative Betrachtungsweisen der Netto-Emissionswirkung von Elektrofahrzeugen angesprochen, die sich aus verschiedenen regulatorischen Rahmenbedingungen ergeben (siehe Kapitel 5).

Emissionsvergleich im Sinne dieses Berichts bedeutet also, die Treibhausgasemissionen in Gramm CO₂-Äquivalent pro Kilometer inklusive der Treibstoffvorketten für BEV und CV zu vergleichen.

¹ Wenn im Text CO₂-Mengenangaben genannt werden, beziehen sich diese normalerweise auf das CO₂-Äquivalent aller Treibhausgase. In einigen der untersuchten Studien wird dies jedoch nicht dokumentiert, die möglichen Abweichungen werden aber als vernachlässigbar angesehen.

² Neueren Erkenntnissen nach hat auch die Emission von Rußpartikeln durch deren strahlungsabsorbierende Wirkung eine bedeutende Rolle im anthropogenen Klimawandel (siehe Kapitel 2.2).

Fahrzeuggrößen

Die heute oder in naher Zukunft zur Verfügung stehenden Batterie-Elektrofahrzeuge im PKW-Bereich gehören überwiegend zum Klein- oder Kleinwagensegment, einige sind Fahrzeuge der Kompaktklasse.³ Dies liegt vor allem an der begrenzten Kapazität der zur Verfügung stehenden Batteriespeicher. Die sich daraus ergebende geringe Reichweite von typischerweise 100–200 km legt vor allem den Einsatz als Stadt- oder Pendlerfahrzeug nahe. Größere und damit auch schwerere Fahrzeuge mit batterie-elektrischem Antrieb zu realisieren, ist gegenwärtig aufgrund der für die gleiche Reichweite größeren benötigten Speicherkapazität deutlich teurer.

Von den untersuchten Studien betrachten drei nur ein einziges Segment, davon zwei die Kompaktklasse und eine einen Kleinwagen. Die übrigen fünf Studien betrachten jeweils Klein(st)wagen und Kompaktfahrzeuge.

Batterietechnologie

Die Mehrzahl der momentan und mittelfristig erhältlichen BEV der neuesten Generation nutzt Lithium-Ionen-(Li-Io)-Batterien in verschiedenen Varianten [vgl. Wietschel et al. 2010:124]. Auch in den untersuchten Studien wird mehrheitlich von diesem Batterietyp ausgegangen, sofern überhaupt Angaben dazu gemacht werden. [Renewability 2009a:104] schreibt Nickel-Metallhydrid-Batterien zwar derzeit noch die größere Bedeutung im BEV-Segment zu, sieht aber auch eine Tendenz zur Li-Io-Technologie. [Horst et al. 2009:32] betrachten Nickel-Metallhydrid-, Li-Io- und Natrium-Nickelchlorid-Batterien separat, kommen für die beiden letztgenannten aber zu sehr ähnlichen Resultaten. Da die Verbrauchsauswirkungen verbesserter Batterietechnologien in absehbarer Zeit als eher gering eingeschätzt werden, wird dieser Parameter im weiteren Verlauf vernachlässigt.

1.2 Liste der untersuchten Studien

Die folgenden Studien wurden für die Erstellung dieses Berichts analysiert, um einen umfassenden Überblick über den aktuellen Stand der wissenschaftlichen Diskussion zu erhalten. Alle ausgewählten Studien beziehen sich explizit auf die Situation in Deutschland. Weiteres Kriterium für die Auswahl war, dass zu allen in Kapitel 2 definierten Parametern Annahmen getroffen werden.

Die einzelnen Studien werden im Anhang nochmals ausführlich vorgestellt.

³ Laut Kraftfahrt-Bundesamtes gehören zum Segment der Kleinwagen etwa der Smart Fortwo oder der Fiat 500, Kleinwagen sind z.B. der VW Polo oder Opel Corsa, Kompaktfahrzeuge VW Golf und Opel Astra.

1. **Autoren:** Blesl et al./Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung, Universität Stuttgart (IER).
Titel: „Entwicklungsstand und Perspektiven der Elektromobilität“ [Blesl et al. 2009].
2. **Autor:** Engel, T. /Deutsche Gesellschaft für Solarenergie; Bundesverband Solare Mobilität.
Titel: „Plug-in Hybrids. Studie zur Abschätzung des Potentials zur Reduktion der CO₂-Emissionen im PKW-Verkehr bei verstärkter Nutzung von elektrischen Antrieben im Zusammenhang mit Plug-in-Hybrid Fahrzeugen“ [Engel 2007].
3. **Autor:** Helmers, E./Umweltcampus FH Trier.
Titel: „Bewertung der Umwelteffizienz moderner Autoantriebe – auf dem Weg vom Diesel-Pkw-Boom zu Elektroautos“ [Helmers 2010].
4. **Autoren:** Helms, H. et al.; Pehnt, M./ Institut für Energie- und Umweltforschung (IFEU).
Titel⁴: „Electric vehicle and plug-in hybrid energy efficiency and life cycle emissions [Helms et al. 2010]“; „Elektroautos in einer von erneuerbaren Energien geprägten Energiewirtschaft“ [Pehnt et al. 2011]; „Elektromobilität und erneuerbare Energien“ [Pehnt 2010].
5. **Autoren:** Horst et al./WWF Deutschland.
Titel: „Auswirkungen von Elektroautos auf den Kraftwerkspark und die CO₂-Emissionen in Deutschland“ [Horst et al. 2009].
6. **Herausgeber:** Öko-Institut e.V.; DLR-Institut für Verkehrsforschung.
Titel: „RENEWABILITY – Stoffstromanalyse nachhaltige Mobilität im Kontext erneuerbarer Energien bis 2030“ [Renewability 2009a, 2009b].
7. **Autoren:** Richter, J; Lindenberger, D./Energiewirtschaftliches Institut an der Universität zu Köln (EWI).
Titel: „Potenziale der Elektromobilität bis 2050 – Eine szenarienbasierte Analyse der Wirtschaftlichkeit, Umweltauswirkungen und Systemintegration“ [Richter u. Lindenberger 2010].
8. **Autoren:** Wietschel, M.; Bünger, U./Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung (Fraunhofer ISI); Ludwig-Bölkow-Systemtechnik GmbH.
Titel: „Vergleich von Strom und Wasserstoff als CO₂-freie Endenergieträger – Studie im Auftrag der RWE AG“ [Wietschel u. Bünger 2010].

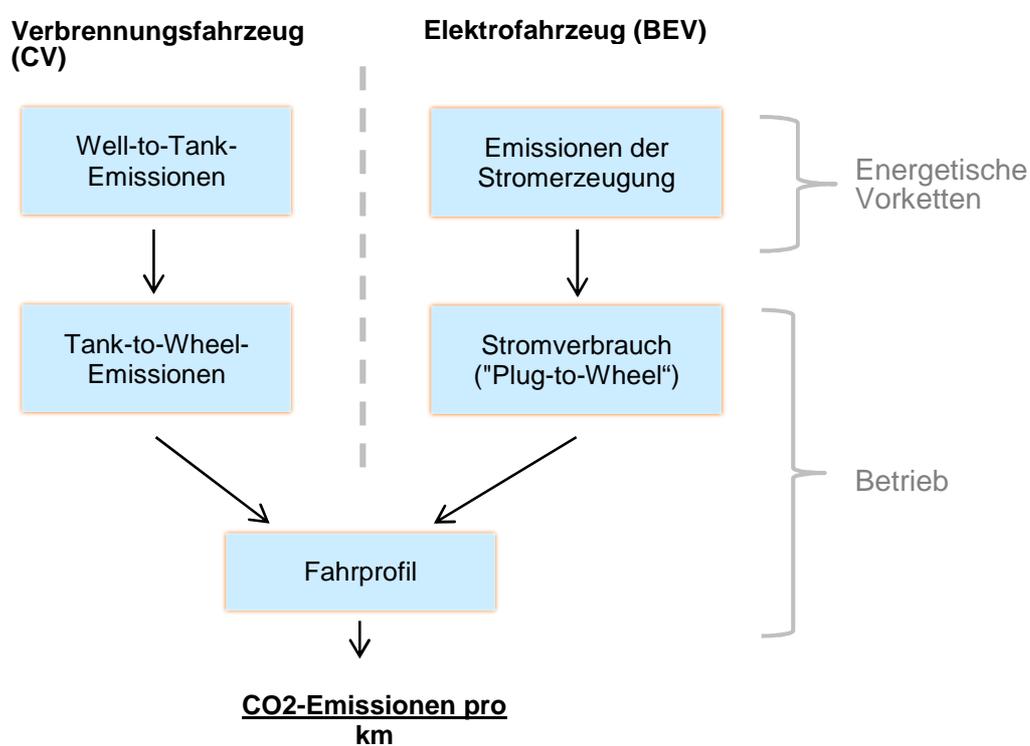
⁴ Im Falle von Helms/Pehnt wird auf drei Arbeiten verwiesen, die das Thema von verschiedenen Seiten beleuchten, aber weitgehend gleiche Annahmen zum Emissionsvergleich treffen. Hauptreferenz in diesem Bericht ist [Helms et al. 2010].

2 Parameter des Emissionsvergleichs

2.1 Überblick

Der Emissionsvergleich von Verbrennungsfahrzeugen und batterie-elektrischen Fahrzeugen basiert auf einer Anzahl von Parametern. Diese sind in Abbildung 2-1 dargestellt.

Abbildung 2-1: Parameter des Emissionsvergleichs



Quelle: Eigene Ausarbeitung

Die ersten beiden Parameter definieren den Referenzfall des Vergleichs, also die Emissionsbilanz eines herkömmlichen Verbrennungsfahrzeugs. Diese setzt sich aus zwei Faktoren zusammen: Erstens, die direkten Emissionen, die bei der Verbrennung des Treibstoffs bei der Fahrt entstehen (sogenannte Tank-to-Wheel (TtW)-Emissionen). Zweitens, die Emissionen, die durch Produktion und Bereitstellung des Treibstoffs entstehen (sogenannte Well-to-Tank (WtT)-Emissionen). Zusammen bestimmen diese beiden Faktoren den gesamten oder „Well-to-Wheel“-Ausstoß an THG.

Im Gegensatz zu CV stoßen BEV im Betrieb keine Treibhausgase aus, weshalb sie manchmal als „Nullemissions-Fahrzeuge“ bezeichnet werden. Allerdings ist die Produktion der benötigten Elektrizität praktisch immer mit einem gewissen Ausstoß von THG verbunden. Analog zu einer Betrachtung „von der Ölquelle bis zum Rad“ (Well-to-

Wheel) in einem CV müssen diese energetischen Vorketten einbezogen werden, wenn der tatsächliche Klimaeffekt von Elektrofahrzeugen untersucht werden soll.

Das bedeutet, dass zwei Parameter zur Berechnung der Emissionen pro Kilometer nötig sind: Einerseits die Bruttomenge an Ladestrom, die für einen Kilometer Fahrt benötigt wird, inklusive Ladeverluste (sogenannter „Plug-to-Wheel“-Verbrauch). Andererseits die Menge an THG, die durch die Produktion dieser Strommenge freigesetzt wurde.

Da der Verbrauch von CV und BEV auch von der momentanen Fahrsituation abhängig ist (z.B. Stadtverkehr oder Landstraße), müssen Annahmen zum Fahrprofil gemacht werden, das dem Emissionsvergleich zugrunde liegt. Beim Vergleich verschiedener Studien und der Entwicklung von Korridoren sind diese Fahrprofile von besonderem Interesse, da sie Annahmen über die tatsächliche Nutzung von BEV und CV in einem bestimmten Fahrzeugsegment enthalten: Je nachdem, welche Anteile von Stadtverkehr, Landstraßen- und Autobahnfahrt welche die Emissionsbilanzen deutlich beeinflussen kann.

2.2 Emissionen der Verbrennungsfahrzeuge (CV)

Berechnung

Der THG-Ausstoß pro Kilometer von Verbrennungsfahrzeugen wird anhand des Verbrauchs und des verwendeten Treibstoffes bestimmt. Offizielle Angaben, die von den Herstellern veröffentlicht werden, beinhalten lediglich die Emissionen, die beim Betrieb durch die Verbrennung des mitgeführten Kraftstoffes entstehen (sogenannte Tank-to-Wheel-Emissionen). Im wissenschaftlichen Kontext ist es jedoch üblich, auch die bei Förderung, Verarbeitung und Bereitstellung der fossilen Kraftstoffe verursachten Treibhausgasemissionen einzubeziehen. Diese Well-to-Tank-Emissionen (siehe Kapitel 2.1) machen bei Benzin noch einmal etwa 15% der Tank-to-Wheel-Emissionen aus, bei Dieselmotoren sind es ca. 19% [JRC 2007]. Diese Werte verringern sich bei der gesetzlich vereinbarten Beimischung von Biotreibstoffen auf 12% für Benzin und 15% für Diesel (ebd.).

Von den acht untersuchten Studien beziehen sieben explizit die Well-to-Tank-Emissionen ein, lediglich [Helmers 2010:574] lässt die Vorketten fossiler Treibstoffe außer Acht.

Einen weiteren Aspekt der Emissionswirkung von Verbrennungsfahrzeugen spricht dagegen als einziger Autor [Helmers 2010:572] an: Speziell Dieselfahrzeuge stoßen im Betrieb Rußpartikel aus. Diese wirken in der Atmosphäre strahlungsabsorbierend, und verringern bei der Ablagerung auf Schnee- und Eisflächen zudem die Rückstrahlung von Sonnenenergie (die sog. Albedo). Dieser rußbedingte Strahlungsantrieb ist, so Helmers, der zweitwichtigste Verursacher des anthropogenen Klimawandels nach CO₂

(ebd.).⁵ In Gramm CO₂-Äquivalent pro Kilometer umgerechnet, steigere dieser Effekt die Tank-to-Wheel-Emissionen von Dieselfahrzeugen um knapp 60% (Diesel nach Euro 4-Norm) bzw. 25% (Euro 5-Norm). Da diese Betrachtung von den anderen untersuchten Studien abweicht, wird letztgenannter Emissionsaufschlag bei der Festsetzung der oberen Grenze des entsprechenden Korridors in Kapitel 3 nicht berücksichtigt.

Wahl des Referenz-Verbrennungsfahrzeugs

Von einem Teil der Studien werden konkrete Modelle zum Vergleich herangezogen. In der Klein(st)wagenklasse ist dies durchweg der Smart Fortwo, der sowohl mit Diesel- und Benzinmotor als auch mit Elektroantrieb erhältlich ist; in der Kompaktklasse orientieren sich mehrere Studien am VW Golf.

Die übrigen Studien ziehen dagegen einen segmenttypischen Durchschnittswert heran, basierend auf den amtlichen Neuzulassungsdaten in einem Referenzjahr [z.B. Engel 2007:61] oder anderen Datenquellen, so etwa [Pehnt 2010:6].

Mit Ausnahme von [Engel 2007] vergleichen alle Studien Benzin- und Dieselfahrzeuge separat, da sich die Treibhaus-Emissionswerte beider Antriebsarten nach heutigem Stand der Technik deutlich unterscheiden. Allerdings werden nicht immer für jedes Fahrzeugsegment auch beide Treibstoffoptionen betrachtet.⁶

Herstellerangaben oder reale Verbrauchswerte

Selbst zwischen Studien, die das gleiche Automodell als Referenzfahrzeug heranziehen, weichen die angenommenen Verbrauchswerte teils deutlich ab:

[Richter u. Lindenberger 2010:63] und [Helmerts 2010:574] nehmen beide den Smart Fortwo Diesel als Referenz-Kleinstwagen, die Emissionen unterscheiden sich jedoch erheblich (102g und 166g, siehe Kapitel 2.2). Dies liegt daran, dass erstere Studie die Herstellerangaben ansetzt, letztere dagegen die Testresultate einer Automobilzeitschrift verwendet.

Herstellerangaben zum Kraftstoffverbrauch basieren in der EU auf dem Neuen Europäischen Fahrzyklus (NEFZ). Dieser beinhaltet zwar Fahranteile innerorts, außerorts und auf der Autobahn, wird von Experten aber als nicht sehr realitätsgetreu kritisiert [z.B. [Helmerts 2010:573-574] – im Alltag verbrauchten viele Fahrzeuge merklich mehr. So beinhaltet der NEFZ beispielsweise keine zusätzlichen Komfortverbraucher wie Klimaanlage.

⁵ Die Studie zitiert u.a. einen Artikel von Ramanathan u. Carmichael [Ramanathan 2008], wonach der Beitrag von Rußpartikeln zum anthropogenen Klimawandel 60% des Beitrages von CO₂ entspricht.

⁶ [Wietschel u. Büniger 2010] ersetzen für den Zeitpunkt 2030 die Benzinfahrzeuge durch Benzinhybrid-Fahrzeuge; diese werden beim Entwickeln der Verbrauchskorridore nicht berücksichtigt.

Einige Studien nehmen deshalb explizit höhere Verbräuche an: [Blesl et al. 2009:32] schlagen 10% auf, [Helmers 2010:574] nimmt einen realen Mehrverbrauch von 17% bei Benzinern und sogar 60% im Falle des Smart Diesel an.

Fahrprofile

Sieben von acht untersuchten Studien geben sogenannte kombinierte Durchschnittsverbräuche bzw. Emissionen an. Diese hängen naturgemäß stark von dem zugrunde gelegten Fahrprofil ab, hier spielt vor allem der Anteil der angenommenen Innerorts-Fahrtstrecken eine wesentliche Rolle. Während einige Studien Herstellerangaben und damit das Fahrprofil des NEFZ zugrunde legen [z.B. Richter u. Lindenberger 2010:63], stellen andere komplexere Annahmen an: [Engel 2007] rechnet die offiziellen Verbrauchsdaten der Neuzulassungen in ein segmentspezifisches Fahrprofil um (60% innerorts/40% außerorts für Kleinwagen, 40% innerorts/60% außerorts für Kompaktfahrzeuge).

[Helms et al. 2010:120] unterscheiden zwei Fahrprofile („Urban“ mit 70% innerorts, 20% außerorts, 10% Autobahn und „Average“ mit 29% innerorts, 39% außerorts, 32% Autobahn). In diesem Vergleich wurde das Profil „urban“ gewählt, da nach Aussage der Autoren dies dem Einsatzbereich von BEV am nächsten kommt.

[Blesl et al. 2009] berechnen sogar kombinierte Emissionen für drei verschiedene Fahrprofile. Hier wurde das Profil „Pendler“ (1/3 innerorts, 2/3 außerorts) gewählt, da es in der genannten Studie auch zur Berechnung von kombinierten Verbräuchen der BEV benutzt wird [Blesl et al 2009:33;53].

Abbildung 2–2: WtW-Emissionen von Klein(st)-CV gemäß der untersuchten Studien

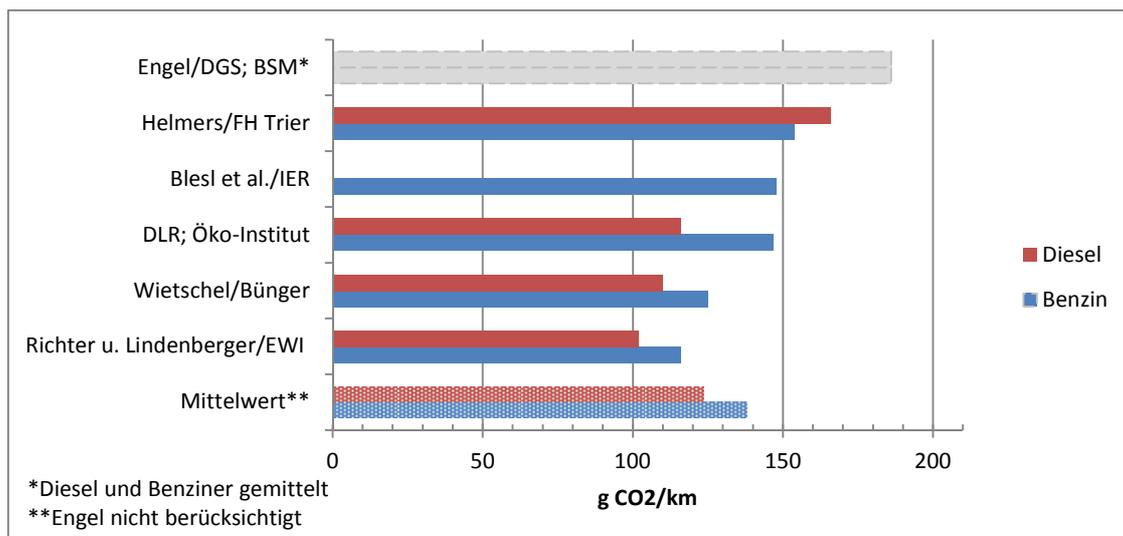
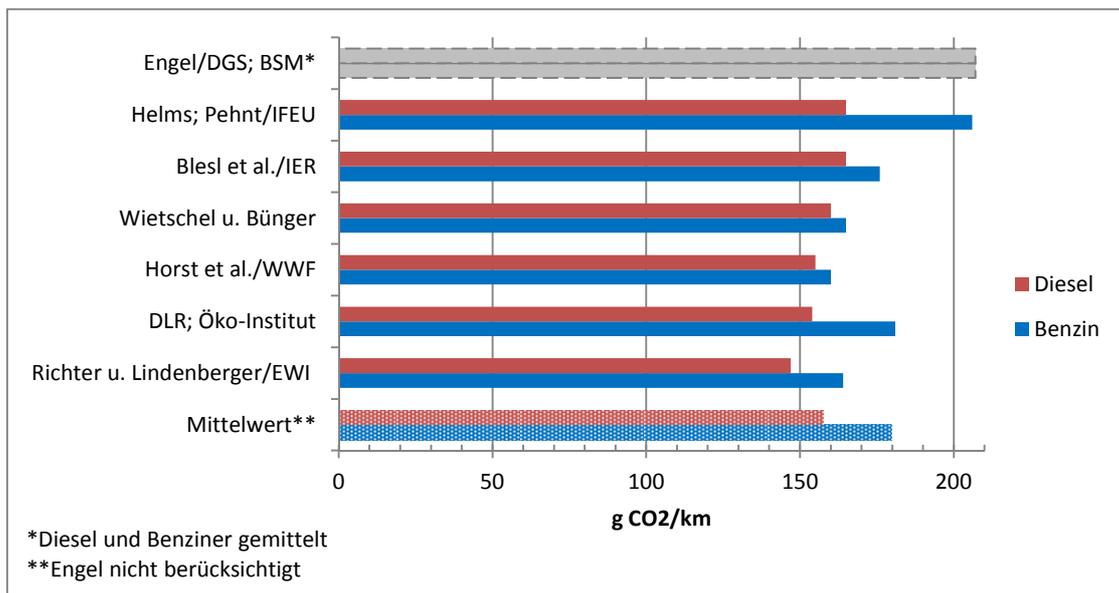


Abbildung 2–3: WtW-Emissionen von Kompakt-CV gemäß der untersuchten Studien



2.3 Verbrauch der Elektrofahrzeuge (BEV)

Der Verbrauch eines Elektrofahrzeugs wird in kWh/100 km angegeben. Die untersuchten Studien nutzen verschiedene Quellen zur Festsetzung des Verbrauchs. Fast immer wird ein „typisches“, hypothetisches BEV betrachtet, für das die Verbrauchsangaben mehrerer am Markt erhältlicher oder angekündigter Fahrzeuge eines Segments gemittelt werden. Dazu werden teilweise Verbrauchsangaben der Hersteller herangezogen. Andere Studien, zum Beispiel [Helmers 2010:574], nutzen praxisnahe Testergebnisse eines einzelnen BEV-Modells.

Ladeverluste und zusätzliche Verbraucher

Beim Laden eines BEV entstehen immer gewisse Ladeverluste, d.h. es wird nicht die gesamte zugeführte Energie in der Batterie gespeichert, sondern ein Teil wird in Wärme umgewandelt und geht verloren. Bei drei der untersuchten Studien ist nicht klar, ob Ladeverluste in den Verbrauchsdaten berücksichtigt sind oder sie nur die Stromentnahme aus der Batterie angeben. Die restlichen fünf Studien gehen auf diese Ladeverluste ein und berücksichtigen sie explizit bei den Verbrauchsangaben. In zwei Fällen werden hierfür übereinstimmend 15% angesetzt [Engel 2007:32; Horst et al. 2009:327], einmal 10% (Helms et al. 2010:115). Zwei nennen keinen genauen Wert [Renewability 2009:112], bzw. eine Bandbreite von 5–40% [Helmers 2010:575]. Letztgenannte Studie weist in diesem Kontext auf die großen potentiellen Auswirkungen einer ineffizienten, verlustbehafteten Ladetechnologie auf die Emissionsbilanz eines BEV hin (ebd.).

⁷ [Horst et al. 2009:32] unterstellen zudem Transportverluste für den Ladestrom i.H.v. 3%.

Ein weiterer wichtiger Punkt bei der Verbrauchsabschätzung von BEV ist, ob **zusätzliche Stromverbraucher** an Bord des Fahrzeugs berücksichtigt wurden. Da anders als beim Verbrennungsfahrzeug kaum nutzbare Abwärme zur Verfügung steht, funktioniert die Innenraumheizung von BEV in der Regel elektrisch, was etwa im Winterbetrieb zu deutlich höheren Energieverbräuchen führt. Auch Klimaanlage, Lüftung oder Scheinwerfer beeinträchtigen den Energieverbrauch anteilmäßig stärker als in einem Verbrennerfahrzeug. Diese Effekte werden nur von [Helms et al. 2010:115–117] genauer quantifiziert, sie rechnen mit Aufschlägen von bis zu 20% gegenüber dem NEFZ-Zyklus durch zusätzliche Verbraucher, wobei diese sich vor allem innerorts bemerkbar machen. Beim Vergleich mit den Normverbräuchen von CV muss allerdings auch beachtet werden, dass der NEFZ dort ebenfalls keine weiteren Verbraucher berücksichtigt.

Nach neuesten Erkenntnissen von [Wagner et al. 2011] nimmt der Mehrverbrauch durch Nebenverbraucher, besonders die Innenraumheizung, jedoch Größenordnungen von gut 5 kWh/100 km an, abhängig von der Fahrsituation und den zugeschalteten Verbrauchern. Wenn die Heizperiode ca. 60% des Jahres umfasst [Wagner et al. 2011:39], ergibt dies aufs Jahr gemittelt einen zusätzlichen Verbrauch von ca. 3 kWh/100 km.

Angesichts dieser Zahlen ist fraglich, ob die durchschnittlichen Verbrauchswerte der BEV, die aus den Studien ermittelt wurden (14,25 bzw. 19,4 kWh/100 km) in der Praxis zu erreichen sind. Da aber, wie erwähnt, eine belastbare Basis an Praxisdaten weiterhin fehlt, soll an dieser Stelle keine abweichende Einschätzung der Verbrauchswerte vorgenommen werden. Bei der Korridorentwicklung in Kapitel 3 ist durch die Annahmen von [Helms et al. 2010] (s.o.) zumindest ein gewisser Mehrverbrauch durch Nebenverbraucher abgedeckt.

Fahrprofile

Wie bei konventionellen Fahrzeugen unterscheidet sich der Energieverbrauch eines BEV je nach Fahrsituation (z.B. innerorts, außerorts, Autobahnfahrt). Anders als bei CV ist der Verbrauch eines BEV auf 100 km jedoch innerorts am geringsten, außerorts etwas höher und bei konstant hohen Geschwindigkeiten (z.B. Autobahnfahrt) am größten.⁸ Dies liegt zum einen daran, dass bei einem BEV im Stop-and-go-Verkehr Leerlaufphasen verbrauchsneutral sind und Bremsenergie rückgewonnen wird, zum anderen daran, dass der Wirkungsgrad des Antriebs in den verschiedenen Fahrsituationen im Vergleich zum CV relativ konstant ist. So wirkt sich primär der Luftwiderstand, und damit die Geschwindigkeit, auf den Momentanverbrauch des BEV aus.

⁸ [Engel 2007] nimmt abweichend für BEV einen niedrigeren Wert außerorts als innerorts an. Dies wird dort nicht näher erläutert.

Von den acht untersuchten Studien stellen zwei separate Verbrauchswerte für innerorts, außerorts und Autobahn auf, weitere zwei unterscheiden nur nach innerorts und außerorts. Auffallend ist der hohe Verbrauch für Autobahnfahrten, wenn dieser angegeben wird: [Helms et al. 2010:120] setzt 25 kWh/100 km für Kompaktfahrzeuge an, [Renewability 2009a] rechnet sogar mit 24 kWh/100 km für Kleinwagen und 28 kWh/100 km für Kompaktfahrzeuge.

Sieben Studien geben zudem einen kombinierten Verbrauch für BEV an, vier davon ausschließlich. In einigen Studien wird, analog zum Vorgehen beim CV, der kombinierte Verbrauch anhand eines oder mehrerer spezifischer Fahrprofile errechnet (siehe Kapitel 2.2). In den anderen Fällen werden dagegen typische kombinierte Verbräuche aus anderen Quellen übernommen bzw. die offiziellen Herstellerangaben verwendet, die auf dem NEFZ beruhen.

Abbildung 2-4: Stromverbrauch von Klein(st)-BEV gemäß der untersuchten Studien

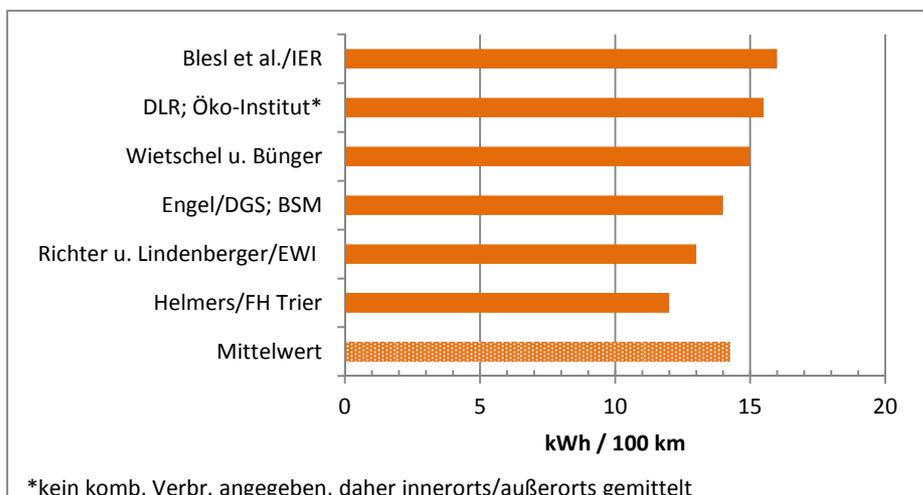
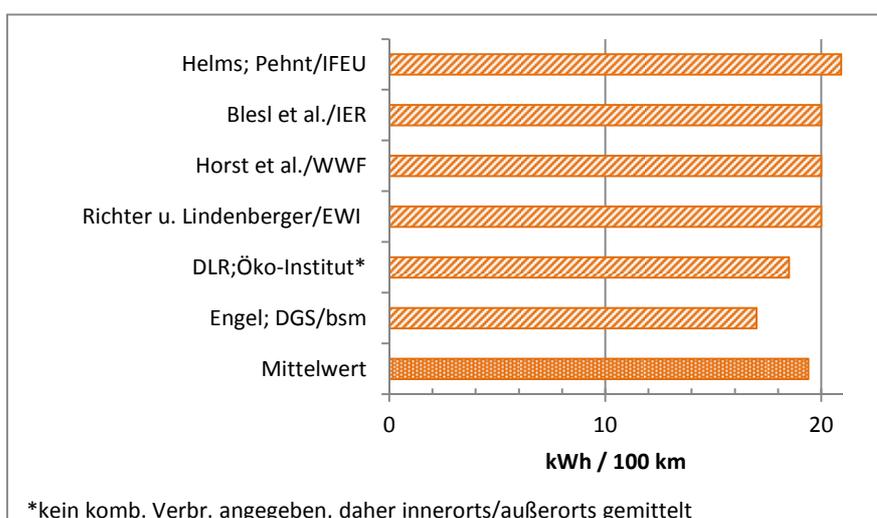


Abbildung 2-5: Stromverbrauch von Kompakt-BEV gemäß der untersuchten Studien



2.4 Emissionen der Stromerzeugung

Wie in Kapitel 2.1 angedeutet, ist der Treibhausgas-Ausstoß der Stromerzeugung ein wesentlicher Faktor für die Emissionsbilanz von Elektrofahrzeugen. Angegeben wird dieser in Gramm CO₂-Äquivalent pro kWh elektrische Endenergie. Die Berechnung erfolgt in der Regel unter Berücksichtigung der spezifischen Vorketten, d.h. inklusive der Bereitstellung und Umwandlung der Primärenergieträger und des Stromtransports, aber auch mitsamt der anteiligen Emissionen beim Kraftwerksbau. So ist zu erklären, dass beispielsweise auch für Windenergie ein gewisser CO₂-Ausstoß veranschlagt wird.

In den allermeisten Fällen wird die Ladung von BEV nicht über autarke Einzelkraftwerke, sondern über das allgemeine Stromnetz realisiert. Zur Bestimmung der hierdurch entstehenden Emissionen gibt es unterschiedliche methodische Ansätze, die zu deutlich unterschiedlichen Einschätzungen der Emissionsbilanz von BEV führen können.

Berechnung über den Emissionsfaktor des Strommix

Die einfachere Variante setzt die CO₂-Emissionen an, die gemäß dem durchschnittlichen Strommix im betreffenden Jahr pro kWh anfallen. Diese Kennzahl, auch als CO₂-Emissionsfaktor der Stromerzeugung bezeichnet, wird in Deutschland vom Umweltbundesamt (UBA) regelmäßig veröffentlicht [z.B. UBA 2009]. 2009 lag dieser Wert laut UBA bei 565 g/kWh (ebd.). Prognosen über die zukünftige Entwicklung dieses Emissionsfaktors werden von verschiedener Seite aufgestellt. Sie werden von mehreren der untersuchten Studien genutzt, um die Emissionswerte von Elektrofahrzeugen in mittelfristigen Zeithorizonten abzuschätzen. So berufen sich zwei Studien [z.B. Wietschel u. Büniger 2010:69] etwa auf die jährlich vom Bundesumweltministerium herausgegebenen „Leitszenarien“ zum Ausbau der Erneuerbaren Energien (EE) [z.B. BMU 2009].

Ergänzend werden von den Autoren einiger Studien weitere hypothetische Strommix-Optionen betrachtet, etwa ein rein fossiler Energiemix, ein Erneuerbaren-Mix oder ein Mix aus EE und Kraft-Wärme-Kopplung, die jeweils spezifische Emissionsfaktoren besitzen.

Berechnung über die Grenzkraftwerks-Betrachtung

Der Strommix-Ansatz ist jedoch nach Ansicht mehrerer Autoren unzulänglich: Durch die Nutzung von Elektrofahrzeugen anstelle von Verbrennungsfahrzeugen würde ein zusätzlicher Bedarf an elektrischer Energie entstehen – und zwar immer dann, wenn ein Elektrofahrzeug zum Laden ans Stromnetz angeschlossen wird. Deshalb müssten die spezifischen Emissionen desjenigen Kraftwerks angesetzt werden, das in diesem Zeitraum zur Deckung des zusätzlichen Strombedarfs hochgefahren werden würde.

Dieses sogenannte Grenzkraftwerk weist typischerweise eine deutlich höhere CO₂-Intensität als der durchschnittliche Strommix auf: Strom aus Erneuerbaren Energien

wird aufgrund des in Deutschland bestehenden Einspeisevorrangs derzeit in der Regel immer in vollem Umfang ins Netz eingespeist. Auch die CO₂-armen Kernkraftwerke werden, soweit am Netz, tendenziell bereits mit voller Auslastung betrieben. Typische Grenzkraftwerke wären also Mittellastkraftwerke wie etwa Steinkohlekraftwerke, sowie Spitzenlast- und Regelkraftwerke, wie etwa Gasturbinenkraftwerke.

Die Grenzkraftwerks-Emissionen werden durch weitere Faktoren beeinflusst: Verschiedene mögliche Ladeszenarien (Zeitpunkt, Dauer, etc.) für Elektrofahrzeuge, unterschiedliche Annahmen zur Verbreitung von BEV, Ausbaupfade des Kraftwerksparks und die Implikationen des grenzübergreifenden europäischen Stromhandels erschweren die Berechnung vor allem für zukünftige Zeitpunkte. Als einziger kalkuliert der Beitrag von [Pehnt et al. 2011:5–9] die Auswirkungen verschiedener Ladeszenarien auf die CO₂-Emissionen. Bei einer unregelmäßigen Ladung von 10–12 Mio. BEV rechnet die Studie mit einem Ansteigen der Spitzenlast um 12%. Ein intelligentes Lastmanagement mit nächtlicher Ladung könnte dagegen einen Beitrag zur Integration erneuerbarer Energieträger leisten, indem sonst nachts abzuschaltende EE-Anlagen am Netz bleiben könnten. Zurzeit stellen jedoch nachts zumeist Steinkohlekraftwerke die Grenzkraftwerke dar. Sie verursachen höhere spezifische Emissionen als die Grenzkraftwerke am Tage (zumeist Gaskraftwerke). Um eine Emissionsverminderung durch intelligentes Lastmanagement zu erreichen, wäre deshalb ein zusätzlicher Zubau von EE-Kraftwerken in Höhe der benötigten Leistung notwendig (ebd.; siehe dazu auch Kapitel 0).

Von den untersuchten Studien gehen nur zwei ausdrücklich auf die Grenzkraftwerks-Problematik ein [Horst et al. 2009:33; Pehnt et al. 2011:5–9]. [Engel 2007] äußert sich zwar nicht explizit dazu, berücksichtigt zusätzlich zu der Strommix-Perspektive aber fossile Einzelkraftwerks-Optionen.

Alternative Betrachtungsweisen der Emissionswirkung der Stromerzeugung, die die Rahmenbedingungen des Emissionshandelssystems sowie die EU-Vorgaben zur Nutzung erneuerbarer Energien berücksichtigen, werden in Kapitel 5 behandelt.

3 Synthese und Ausblick

3.1 Entwicklung von Korridoren

In Kapitel 2.3 wurden die Werte dargestellt, die von den untersuchten Studien für die Verbräuche von BEV angesetzt wurden. Mithilfe der Emissionsfaktoren des Ladestroms können hieraus nun Emissionskorridore für verschiedene Stromerzeugungsoptionen⁹ gebildet werden. Abbildung 3-1 und Abbildung 3-2 vergleichen diese mit dem Emissionskorridor der Verbrennungsfahrzeuge im jeweiligen Fahrzeugsegment, wie in Kapitel 2.2 dargestellt.

An der Breite der Korridore wird deutlich, dass die gewählten Parameter für CV und BEV das Ergebnis deutlich beeinflussen können.¹⁰ Trotzdem ist als größter Einfluss für die Emissionsbilanz eines BEV der Emissionsfaktor der Stromerzeugung erkennbar.

Die beiden Abbildungen zeigen, dass ein mit Kohlestrom geladenes Elektrofahrzeug Emissionen in der Größenordnung eines vergleichbaren Verbrennungsfahrzeugs verursacht. Ob die Werte letztlich über oder unter denen des Vergleichsfahrzeugs liegen, hängt von der Wahl der jeweiligen Parameter ab.

Wird der Emissionsfaktor des Strommix angesetzt, sind je nach Parameterwahl Einsparungen von wenigen Prozent bis zu über 50% zu erwarten. Im Mittel liegen diese bei etwa 30%. Wird der Ladestrom aus einem modernen Gaskraftwerk bezogen, liegen die relativen Einsparungen gegenüber dem CV mit 30–70% noch darüber.

Klar wird jedoch auch, dass auch bei effizient erzeugtem fossilem Ladestrom noch signifikante Emissionen pro Kilometer anfallen. Weitgehende Emissionsfreiheit erreicht ein BEV nur mit Ladestrom aus erneuerbaren Energiequellen.

⁹ Um die Komplexität zu reduzieren, wurden für die einzelnen Stromerzeugungsoptionen einheitliche Emissionsfaktoren angesetzt, auch wenn diese zwischen den untersuchten Studien teilweise abweichen (zu den unterschiedlichen Annahmen zum deutschen Strommix vgl. Tabelle 3-1).

¹⁰ Es sei daran erinnert, dass zusätzliche Stromverbraucher an Bord von BEV in den untersuchten Studien nicht ausreichend berücksichtigt sein könnten, was die Emissionswerte der BEV über die gezeigten Korridore hinaus erhöhen könnte (siehe Kapitel 2.3). Auf Seiten der CV wurde der mögliche strahlungsantreibende Effekt von Dieselruß nicht berücksichtigt, der hier wiederum zu einer schlechteren Emissionsbilanz führen könnte (siehe Kapitel 2.2).

Abbildung 3-1: WtW-Emissionskorridore für CV und BEV – Klein(st)wagen

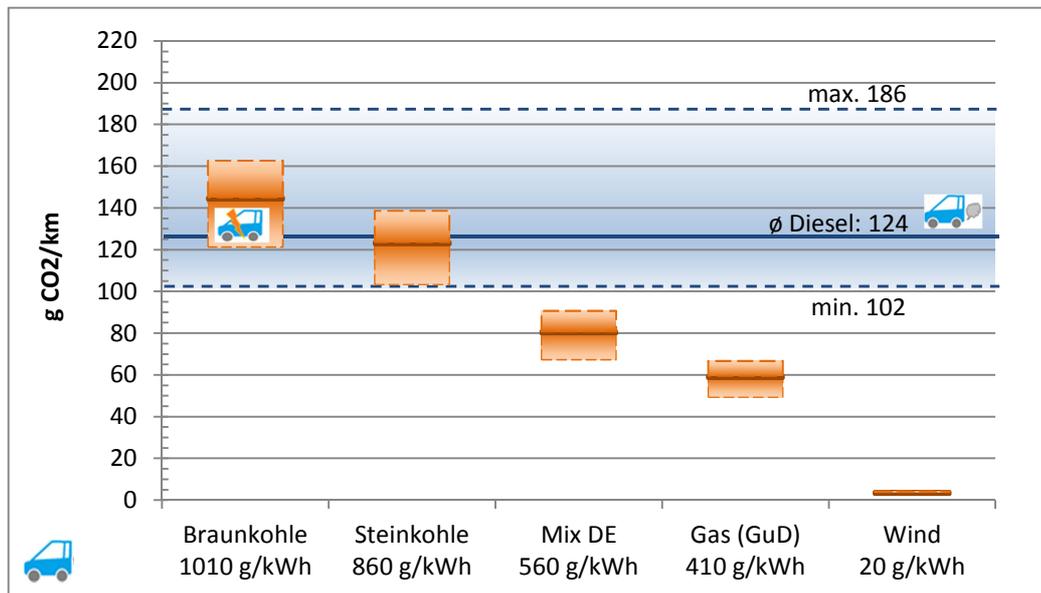
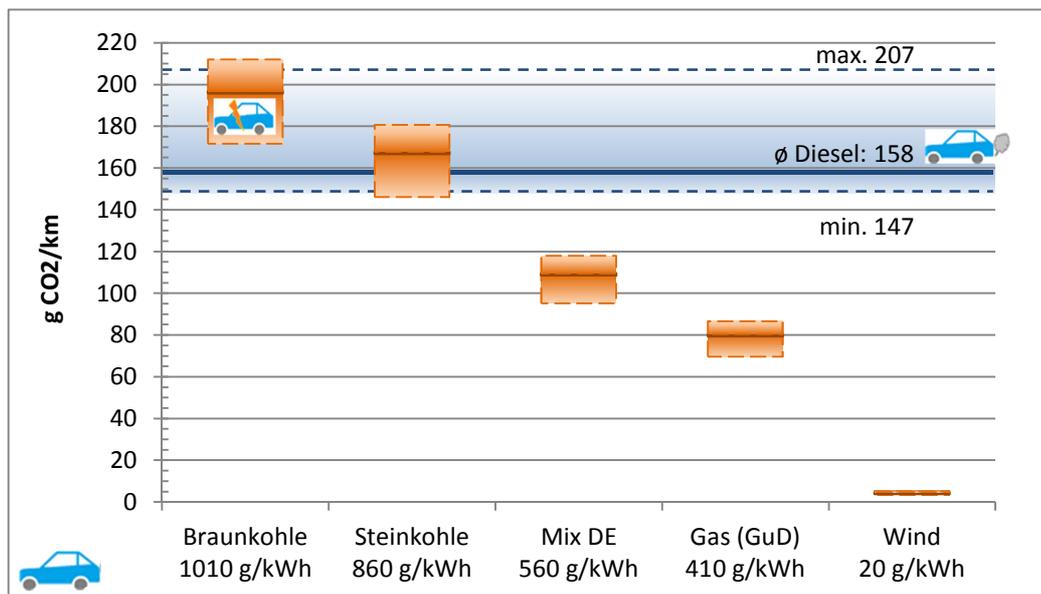


Abbildung 3-2: WtW-Emissionskorridore für CV und BEV – Kompaktklasse



Annahmen:

- Wertekorridore BEV und CV abgeleitet aus den untersuchten Studien
- Verbrauchskorridore BEV (kWh/100 km):
 - Klein(st)wagen: Min. 12, Mittelwert 14,25, max. 16.
 - Kompaktklasse: Min. 17, Mittelwert 19,4; max. 20,9.
- Emissionskorridore CV (WtW) umfassen Benziner u. Diesel. Mittelwerte nur für Diesel berechnet.
- Emissionsfaktor Strommix DE 2010: nach [UBA 2009]
- Kraftwerks-Emissionsfaktoren: nach GEMIS 4.6 ([Öko-Institut 2010]).

3.2 Resultate der untersuchten Studien

Tabelle 3-1 zeigt die Ergebnisse der einzelnen untersuchten Studien hinsichtlich der Emissionsbilanz von BEV (bei Ladung mit Strommix) im Vergleich zu CV. Die erstaunliche Bandbreite der Resultate zwischen 3% und mehr als 50% Einsparung verdeutlicht den Einfluss der Eingangsparameter.¹¹ Andererseits liegen vier der Studien mit moderaten berechneten Einsparungen von 20–30% relativ dicht beieinander.

Tabelle 3-1: Ergebnisse der untersuchten Studien zur Emissionsbilanz von BEV

Studie	Emissionen der Stromerzeugung (DE Mix; g/kWh)	Fahrzeugsegment	CV-Emissionen, WtW (g CO ₂ /km)	BEV-Emissionen (g CO ₂ /km)	BEV Bilanz
Engel/DGS; BSM	650	Klein(st)	186 (Di./Benz.)	91	-51%
		Kompakt	207 (Di./Benz.)	111	-46%
Richter u. Lindenberger/EWI ¹²	596	Klein(st)	102 (Diesel)	79	-22%
		Kompakt	147 (Diesel]	122	-17%
Wietschel u. Bünger/ISI; LBST	527	Klein(st)	110 (Diesel)	79	-28%
Helmers/FH Trier	600	Klein(st)	148 (Benzin) ¹³	71	-52%
Blesl et al./IER	624	Klein(st)	133 (Benzin)	100	-25%
		Kompakt	165 (Diesel)	127	-23%
Helms; Pehnt/IFEU ¹⁴	630	Kompakt	165 (Diesel)	131	-21%
Renewability/DLR; Öko-Institut ¹⁵	596	Klein(st)	116 (Diesel)	86	-26%
		Kompakt	154 (Diesel)	110	-29%
Horst et al./WWF	625	Kompakt	155 (Diesel)	150	-3%

¹² Fahrprofil: Pendler (33% innerorts, 67% außerorts). Energieversorgung laut Szenario I („Hoher Gasanteil“).

¹³ 12% Well-to-Tank-Emissionen hinzugefügt; TtW-Emissionen mit 132g angegeben. Dieselfahrzeug liegt darüber: 180g inklusive Strahlungsantrieb durch Dieselruß, 150g ohne.

¹⁴ Fahrprofil: „Urban“ (70% innerorts, 20% außerorts, 10% Autobahn).

¹⁵ kein Fahrprofil/kombinierter Verbrauch angegeben, daher Fahrprofil 50% innerorts/50% außerorts angenommen.

3.3 Prognose bis 2030

Insgesamt fünf der untersuchten Studien unternehmen den Versuch, die Emissionsbilanz von BEV auch für zukünftige Zeitpunkte zu untersuchen.

Für den Strommix prognostizieren alle fünf einen deutlich sinkenden Emissionsfaktor. Da hier jedoch das Bezugsjahr und die Ausgangsgröße variieren, wird in der Zusammenstellung in Abbildung 3-3 auf das Referenzszenario der „Energieprognose 2009“ ([IER/RWI/ZEW 2009]) zurückgegriffen. Dies nimmt einen Atomausstieg bis ca. 2022 an und liegt mit einem vorhergesagten Rückgang des Emissionsfaktors um etwa 50% im Mittelfeld der untersuchten Studien.

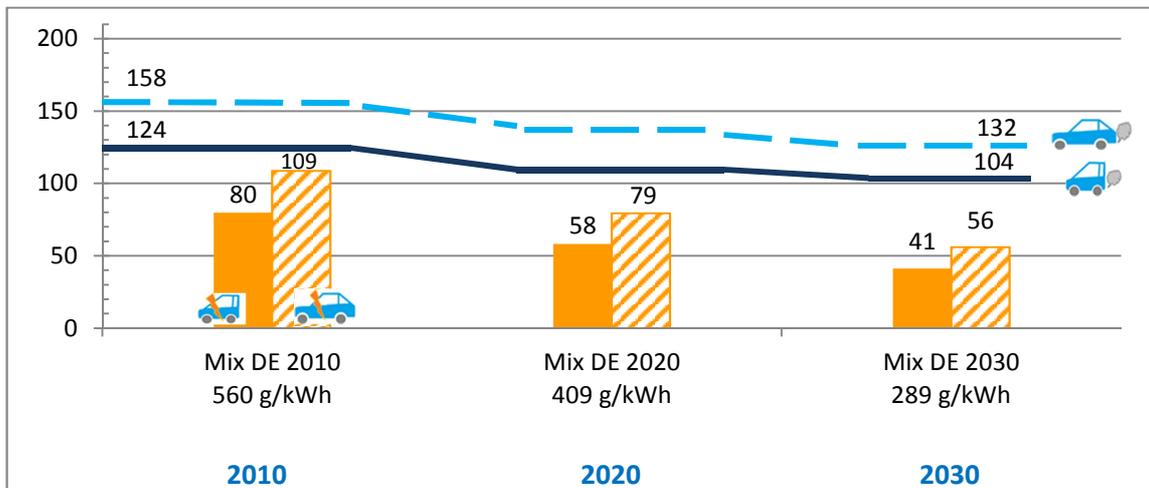
Über die zukünftige Entwicklung der Verbräuche von CV treffen nur drei Studien Annahmen. Zwei Studien nehmen hier die EU-Verordnung 443/2009 [EU 2009] als Richtschnur, die ab 2020 eine verbindliche Flottenobergrenze von 95 g/km (Tank-to-Wheel) aufstellt, so zum Beispiel [Renewability 2009b:29].¹⁶ Letztgenannte Studie geht außerdem davon aus, dass sich ab ca. 2015 die spezifischen Emissionen von Benzin- und Dieselfahrzeugen angleichen werden; andere erwarten nur eine gewisse Annäherung, so etwa [Richter/Lindenberger 2010:70]. Im Mittel werden bis 2030 für Dieselfahrzeuge um 15–20% niedrigere WtW-Emissionen vorausgesagt.

Hinsichtlich des Verbrauchs von BEV nimmt nur eine Studien veränderte Werte an [Blesl et al. 2009]; die restlichen vier gehen von konstanten Verbräuchen aus bzw. machen hierzu keine Angaben. In Abbildung 3-3 wurden der Einfachheit halber ebenfalls konstante Verbräuche auf dem Niveau des heutigen Durchschnitts (vgl. Kapitel 2.3) angenommen.

Es wird sichtbar, dass die relativen Emissionsvorteile von BEV gegenüber der heutigen Situation zunehmen, und zwar von ca. 30% heute auf über 50% im Jahre 2030. Dies liegt daran, dass der Emissionsfaktor der Stromerzeugung mutmaßlich stärker zurückgeht als die Emissionen der Verbrennungsfahrzeuge.

¹⁶Die Entwicklung der Well-to-Tank-Emissionen wird von einigen Autoren separat modelliert (z.B. [Richter u. Lindenberger 2010:65]), auch spielt die womöglich steigende Beimischung von Biotreibstoffen eine Rolle. Dieser Parameter wird hier vernachlässigt; durch eine höhere Beimischungsquote von Biokraftstoffen könnte der Emissionsrückgang stärker ausfallen.

Abbildung 3–3: Prognose der Emissionen von BEV und CV (WtW) bis 2030



Annahmen:

- Verbrauch BEV: Klein(st)wagen 14,25 kWh/100km; Kompaktklasse 19,4 kWh/100km
- WtW-Emissionen CV: Benzin-Klein(st)wagen und Diesel-Kompaktfahrzeug, Mittelwert abgeleitet aus Prognosen in den untersuchten Studien
- Strommix DE 2020 und 2030: nach Energieprognose 2009, Referenzszenario [IER/RWI/ZEW 2009]

Auch aus der Grenzkraftwerks-Perspektive betrachtet sinken die Emissionen von BEV, da bis 2030 mit einem weitgehenden Ersatz alter fossiler Kraftwerke durch modernere Anlagen zu rechnen ist. Zusätzlich könnte die Einführung der Kohlenstoffabscheidung und -Speicherung (CCS) die spezifischen Emissionen von Grenzkraftwerken reduzieren.

4 Nutzung von zusätzlichem Ökostrom

Als Reaktion auf die erheblichen Emissionen, die sich bei der Ladung eines BEV mit fossil erzeugtem Strom ergeben, liegt die Forderung nahe, zur Ladung ausschließlich Strom aus erneuerbaren Energien zu nutzen. In der Tat beziehen fünf der untersuchten Studien eine oder mehrere Optionen der Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien in den Emissionsvergleich ein.

Bei näherer Betrachtung der regulatorischen Rahmenbedingungen offenbaren sich jedoch einige Probleme, die die Bilanz einer Verwendung von Ökostrom beeinflussen können. Im Kern geht es darum sicherzustellen, dass zur Deckung des BEV-Verbrauchs *zusätzlicher* Ökostrom produziert wird, also nicht einfach ein Anteil des ohnehin produzierten Ökostroms beansprucht wird.

Neubau von EE-Kraftwerken als Ausgleich

Eine mögliche Option zur Versorgung der BEV mit Ökostrom wäre laut [Pehnt 2010:12], den Verkauf eines BEV mit der Schaffung neuer EE-Produktionskapazität zu verbinden, entweder als Verpflichtung oder durch sonstige Anreize.¹⁷ Adressaten wären entweder BEV-Besitzer oder Hersteller, auch Fonds-Modelle seien denkbar. Wird allerdings ein EE-Kraftwerk „zum Ausgleich“ gebaut, das den Strom lediglich auf Basis des Erneuerbare-Energien-Gesetz ins Netz einspeist, so kann dies nicht als zusätzliche Ökostrom-Produktion angesehen werden: Falls das Kraftwerk nach EEG rentabel ist, wäre es wohl auch ohne den BEV-Hintergrund gebaut worden [Pehnt 2010:9].

Eine wirklich zusätzliche Produktion ergäbe sich dagegen, wenn die neu gebaute Anlage, wenn benötigt, direkt Strom zur Ladung von BEV liefert und nur die restliche Produktion nach EEG einspeist oder am freien Markt als zertifizierten Ökostrom verkauft wird. Ein kostendeckender Betrieb ist so allerdings mittelfristig schwierig, so dass gegenüber der Verwendung des herkömmlichen Strommix Mehrkosten für die BEV-Ladung anfallen. Diese würden je nach Modell vom Hersteller oder vom Besitzer getragen.

Bezug von Ökostrom-Produkten

Falls der BEV-Besitzer ein auf dem Markt erhältliches Ökostrom-Angebot zur Deckung des Strombedarfs nutzt, hängt die Zusätzlichkeit von den Konditionen des Angebots ab: Gewisse Produkte werden lediglich durch den Erwerb günstiger Herkunftszertifikate, beispielsweise von ausländischen Wasserkraftwerken, als Ökostrom deklariert, ohne

¹⁷[Pehnt 2010:12] schlägt vor, verkaufte BEV nur dann mit 0g auf den Flottendurchschnitt des Herstellers anzurechnen, wenn dieser für ausreichend zusätzliche EE-Produktion sorgt. Als Anreize für den Endnutzer könnten etwa Privilegien im Straßenverkehr oder eine CO₂-abhängige Besteuerung des Ladestroms dienen (ebd.).

dass damit eine zusätzliche Produktion verbunden wäre. Von unabhängigen Stellen zertifizierter Ökostrom muss dagegen einen bestimmten Anteil Strom aus neueren, nicht abbeschriebenen Kraftwerken beinhalten; einige Anbieter verpflichten sich selbst zu Investitionen in neue Anlagen. Hier ist anzunehmen, dass zumindest eine teilweise Zusätzlichkeit der EE-Produktion realisiert wird [vgl. Richter u. Lindenberger 2010:71]. Diese Variante ist wiederum mit Mehrkosten für den BEV-Besitzer gegenüber einer Nutzung des herkömmlichen Strommix verbunden.

Anpassung der EE-Ausbauziele

Eine dritte Alternative zielt auf die von der Bundesregierung verbindlich festgelegten Ausbauziele für die erneuerbare Stromerzeugung ab: Die für Elektrofahrzeuge genutzte Strommenge könnte – unabhängig von ihrer tatsächlichen Herkunft – von der EE-Gesamtproduktion abgezogen werden. Dadurch müsste durch verstärkte Anreize eine zusätzliche Produktion in dieser Höhe sichergestellt werden, um die EE-Ausbauziele zu erreichen. Die Kosten für die CO₂-neutrale Integration der Elektromobilität trüge in diesem Fall die Allgemeinheit. Dies setzt allerdings voraus, dass die Ausbauziele nicht sowieso übererfüllt werden – was sich jedoch gemäß BMU-Leitstudie [BMU 2009] abzeichne, so [Pehnt 2010:14].

5 Alternative Betrachtungsweisen der Emissionseffekte

5.1 Wechselwirkung mit Flottenobergrenzen

Nach EU-Recht gelten für die Automobilhersteller ab 2012 verbindliche Obergrenzen für die durchschnittlichen CO₂-Emissionen ihrer verkauften Fahrzeuge (vgl Kapitel 3.3). Wenn diese Flottenobergrenzen überschritten werden, sind Strafzahlungen vorgesehen [EU 2009:7–8]. Gemäß der aktuellen Gesetzgebung wird jedes verkaufte Elektroauto in der Statistik als 0g-Fahrzeug registriert, die bei der Produktion des Ladestroms entstehenden Emissionen werden nicht berücksichtigt. In einer Übergangszeit bis 2015 wird jedes verkaufte Elektrofahrzeug sogar mehrfach gezählt.¹⁸

Auf eine mögliche negative Gesamtwirkung dieser Regelung weist [Pehnt 2010:9] hin: Durch dieses Reglement, sollte es Bestand haben, könnten die Hersteller durch eine verhältnismäßig bescheidene Anzahl an verkauften Elektrofahrzeugen den Flottenverbrauch wie gefordert senken, ohne dass für die Verbrennungsfahrzeug-Palette alle technisch möglichen Verbrauchssenkungen realisiert werden müssten. Es sei aber vorstellbar, dass die Emissionen der Kraftstoffbereitstellung, und damit auch der Stromerzeugung, künftig in die Berechnung einbezogen werden (ebd.). Eine Quantifizierung des Effektes versucht der Autor nicht, diese wäre auch stark von der Marktverbreitung von BEV abhängig und auf Ebene der Einzelfahrzeuge schwer abzubilden.

5.2 Wechselwirkung mit Emissionshandelssystem

Ein alternativer Ansatz zur Emissionsbestimmung der Stromproduktion für Elektrofahrzeuge zielt auf die Implikationen des Europäischen Emissionshandelssystems (EU ETS, von engl. *European Union Emission Trading System*) ab. Die EU-Gesetzgebung legt hierbei Mengengrenzen für den CO₂-Ausstoß in Industrie und Energieproduktion fest. Einzelne Emittenten bekommen Emissionszertifikate zugeteilt bzw. müssen sie kaufen, sie können zudem an einer Börse gehandelt werden (sog. Cap&Trade-System). In den kommenden Jahren sollen die Gesamtemissionsmenge und damit die verfügbaren Zertifikate sukzessive merklich verringert werden.

Die Kraftstoffnutzung im Straßenverkehr unterliegt bisher nicht dem Emissionshandel, im Gegensatz zum Stromsektor. Durch den Einsatz von BEV erhöht sich die Stromnachfrage und -produktion. Hierfür müssen nach momentaner Rechtslage Emissionszertifikate erworben werden, und der zugehörige Ausstoß rechnet sich auf die nach oben gedeckelte Gesamtemissionsmenge an. Somit kann argumentiert werden, dass

¹⁸ Bis 2013: 3,5-fach, 2014: 2-fach, 2015: 1,5-fach [EU 2009:6].

der zusätzliche Stromverbrauch von BEV in der Gesamtbilanz emissionsneutral ist, ungeachtet der tatsächlich freiwerdenden Emissionen – diese würden nach der Logik des „Cap&Trade“ an anderer Stelle eingespart [u.a. Richter u. Lindenberger 2010:70].

Diese Betrachtungsweise fußt allerdings auf der Annahme eines optimal funktionierenden EU ETS, bei dem die Mengenbegrenzung entsprechend strikt angepasst und in jedem Fall voll ausgeschöpft wird, so dass sich der Preis für Emissionszertifikate auf entsprechend hohem Niveau einpendelt [Pehnt 2010:9]. Zudem könnten Stromproduzenten darauf drängen, dass für BEV verwendete Strommengen aus dem EU ETS herausgenommen werden, um Chancengleichheit mit Verbrennungsfahrzeugen herzustellen.

6 Verortung der Ergebnisse der Modellregion

6.1 Zielsetzung

Das Ziel der Verortung der Ergebnisse ist es, aus den Daten, die in der Modellregion gewonnen werden konnten, durchschnittliche Stromverbräuche pro 100 km zu berechnen und diese mit den hier aus anderen Studien zitierten Werten in Beziehung zu bringen.

6.2 Datenbasis

Die Datensätze, wurden vom DFKI (Deutsches Forschungszentrum für Künstliche Intelligenz) zur Verfügung gestellt. Sie basieren auf Messwerten, die in den vom DFKI und vom Fraunhofer IFAM betriebenen Fahrzeugflotten im Projekt PMC (Personal Mobility Center) Modul 2 „Intelligente Integration Elektromobilität“ erhoben wurden.

Die Datensätze bestehen aus zwei Teilen:

1. Eine umfangreiche Datenbank enthält für jedes Fahrzeug eine Vielzahl von Messwerten. Jeder Messwert besteht unter anderem aus einer Message-ID, einer Fahrzeug-ID, dem sekundengenauen Zeitpunkt des Ereignisses in dem sich der Messwert ändert, dem Messwerttyp (z.B. Batteriespannung) und dem tatsächlichen Messwert (z.B. 380 Volt für die Batteriespannung). Zu beachten ist, dass nur die Messwerttypen verwendet werden konnten, die auch von den Fahrzeugherstellern freigegeben worden sind. Einige der Messwerte erscheinen dabei unplausibel. So sind z.B. viele Daten des Messwerttyps zum Ladevorgang, bei dem eine Null ausgegeben wird, wenn ein Ladevorgang beendet wird, und eine Eins ausgegeben wird, wenn ein Ladevorgang beginnt, nicht schlüssig, da die Anzahl der Null-Werte nicht mit der Anzahl der Eins-Werte übereinstimmt. Auch beim Messwerttyp „SOC“ (State of Charge), der den Ladezustand der Batterie in Prozent anzeigt, gibt es Unplausibilitäten, wenn z.B. der Ladezustand nach einer 60 km langen Fahrt noch über 95% beträgt.
2. Die zweite Datenbank enthält die vom DFKI aus den GPS-Werten ermittelten Tripdaten, wobei für jeden Trip die Fahrzeug-ID, die Startzeit, die Endzeit und die Länge des Trips in km angegeben werden. Jeder Trip ist dabei so definiert worden, dass ein neuer Trip dann anfängt, wenn die vorherige Standzeit des Fahrzeugs mindestens 10 Minuten betragen hat.

6.3 Ansatz und Methodik

Nicht alle der von den Datenloggern aufgezeichneten Ereignisse sind für diese Auswertung schlüssig (z.B. Batterie Ladezustand (in %) oder der Wert der angibt, ob die Batterie gerade geladen wird oder nicht). Die für die Berechnung der Energiebedarfe erforderlichen Werte für die Batteriespannung und den Strom sind jedoch für viele Zeitabschnitte durchgehend vorhanden.

Da die Tripdaten mit einer aus der Ungenauigkeit der GPS-Werten resultierenden Unsicherheit behaftet sind, die zu einigen unrealistischen Werten geführt haben, wurden die Tripdaten, welche die folgenden Kriterien erfüllen, für diese Untersuchung, herausgefiltert:

- Unplausible Durchschnittsgeschwindigkeit (über 100 km/h)
- Unplausible Durchschnittsgeschwindigkeit bei kurzen Wegstrecken (über 90 km/h, bei Herausrechnung der Beschleunigungszeit¹⁹)
- unrealistisch lange Trip-Dauer (über 2,5 Stunden) bei niedriger Durchschnittsgeschwindigkeit (unter 10 km/h)
- sehr niedrige Durchschnittsgeschwindigkeit (unter 5km/h)

Die Berechnung des Strombedarfs innerhalb dieser Zeiträume erfolgte sodann nach der folgenden Methodik:

Für jeden Zeitabschnitt zwischen zwei Messwerten (in der Regel ein bis zwei Sekunden) wurde überprüft, ob:

- das Fahrzeug steht (ein möglicher Ladestrom wurde also aus dem Netz und nicht mittels einer rekuperativen Bremsung bezogen)
- ein Wert für Batteriespannung und -strom vorliegt
- der Wert für den Strom negativ ist (per Definition bedeutet dies Ladung, im Gegensatz zu positiven Werten für Entladeströme)

Waren diese Bedingungen erfüllt, wurde die Energieaufnahme in diesem Zeitabschnitt berechnet ²⁰. Diese Energiemengen wurden sodann addiert.

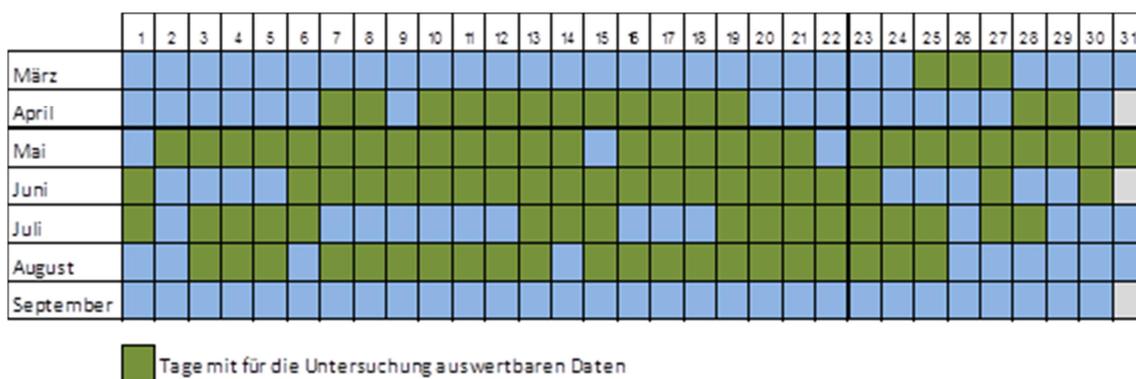
Da jedoch der Ladezustand der Batterie nicht bekannt ist, ist das Ergebnis dieser Berechnung mit einer Unsicherheit behaftet, weil im Maximalfall für jeden Betrachtungszeitraum eine volle Batterieladung unberücksichtigt bleibt²¹. Um diesen Effekt so ge-

¹⁹ Annahme: 0,1 s/(km/h)

²⁰Batteriespannung x Ladestrom x Zeit bis zum nächsten Messwert

²¹ Wenn die Batterie am Anfang des Betrachtungszeitraumes vollständig geladen war und am Ende vollständig entladen, bleibt diese Batterieladung für die Energiebedarfs-Berechnung unberücksichtigt, im umgekehrten Fall wird eine vollständige Ladung berücksichtigt, die während des Betrachtungszeitraumes nicht benötigt wurde.

ring wie möglich zu halten, wurden aus den vorliegenden Daten die Zeiträume ausgewählt, die aus den meisten zusammenhängenden Tagen mit auswertbaren Daten bestanden. Ein Tag galt prinzipiell als auswertbar, wenn für ihn sowohl Daten über die Batterie (Zeitpunkt der Messung, Batterielade- oder -entladestrom und Batteriespannung), als auch Daten über die Fahrten (Start- und Endzeitpunkt sowie zurückgelegte Distanz) vorlagen. In Abbildung 6-1 wird beispielhaft eine Übersicht über die auswertbaren Daten eines der Fahrzeuge für den Zeitraum März bis September dargestellt.



Quelle: Eigene Berechnung auf Grundlage der vom DFKI zur Verfügung gestellten Daten

Abbildung 6-1: Beispielhafte Übersicht über auswertbare Daten für ein Elektrofahrzeug

Für die Fahrzeuge mit Hochtemperatur-Batterien („Fahrzeugtyp A“) wurden aus den Messwerten für alle Fahrzeuge die zehn längsten Zeiträume ermittelt. Der längste Zeitraum, der zur Ermittlung des durchschnittlichen Verbrauchs herangezogen wurde, ist 54 Tage lang. Der kürzeste ist 18 Tage lang.

Um einen Vergleichswert zu haben, wurden für einen weiteren Fahrzeugtyp („Fahrzeugtyp B“), der mit Lithium-Batterien ausgestattet ist, die Daten von einem Fahrzeug ausgewertet. Hier wurden für sieben Zeiträume, die sechs Tage oder länger sind (der längste Zeitraum ist hier 13 Tage lang) die durchschnittlichen Verbräuche berechnet.

6.4 Ergebnisse

Für den Fahrzeugtyp mit Hochtemperatur-Batterien wurde für zehn Zeiträume der durchschnittliche Verbrauch errechnet. Eine genaue Aufstellung über die durchschnittlichen Verbräuche in den jeweiligen Zeiträumen ist Tabelle 6-1 zu entnehmen. Die errechneten durchschnittlichen Verbräuche liegen zwischen 19,0 kWh/100 km und 24,7 kWh/100 km. Wird aus diesen zehn Werten das gewichtete Mittel gebildet, liegt der Verbrauch bei durchschnittlich 22,2 kWh/100 km. Die Zeiträume liegen alle in den Monaten März bis August 2011.

Tabelle 6-1: Durchschnittliche Verbräuche in kWh/100 km für Fahrzeugtyp A

Auto	Zeitraum	Tage	Distanz [km]	Verbrauch [kWh/100 km]
1	26.4.-18.6.	54	2177	23,3
2	5.6.-6.7.	32	1039	22,8
3	27.4.-21.5.	25	1307	20,3
1	25.3.-16.4.	23	1297	24,7
2	1.5.-20.5.	20	453	23,5
4	13.6.-2.7.	20	623	22,7
1	20.6.-8.7.	19	694	19,0
5	20.6.-8.7.	19	1059	20,0
6	15.7.-1.8.	18	661	20,7
7	6.6.-23.6.	18	537	24,5
gewichteter Mittelwert:				22,2

Quelle: Eigene Berechnung auf Grundlage der vom DFKI zur Verfügung gestellten Daten

Für den Fahrzeugtyp mit Lithium-Batterien sind die Ergebnisse in Tabelle 6-2 aufgelistet. Mit durchschnittlichen Verbräuchen zwischen 15,1 kWh/100 km und 24,0 kWh/100 km und einem gewichteten Mittelwert von 18,6 kWh/100 km liegt der durchschnittliche Verbrauch des Vergleichsfahrzeugs deutlich unter dem des mit Hochtemperatur-Batterie ausgestatteten Fahrzeugtyps. Die Zeiträume, die für dieses Fahrzeug ausgewertet wurden, liegen in den Monaten Mai bis September 2011.

Tabelle 6–2: Durchschnittliche Verbräuche in kWh/100 km für Fahrzeugtyp B

Zeitraum	Tage	Distanz [km]	Verbrauch [kWh/100 km]
13.5.–25.5.	13	577	18,1
15.7.–22.7.	8	271	17,8
30.8.–7.9.	8	179	24,0
19.8.–25.8.	7	284	15,1
27.5.–1.6.	6	3086	20,4
3.6.–8.6.	6	221	15,3
1.8.–6.8.	6	229	21,6
gewichteter Mittelwert:			18,6

Quelle: Eigene Berechnung auf Grundlage der vom DFKI zur Verfügung gestellten Daten

6.5 Verortung der Ergebnisse in den untersuchten Studien

Im Vergleich zu dem Stromverbrauch der Fahrzeuge in den untersuchten Studien (für Kleinst-BEV zwischen rund 12 und rund 16 kWh/100 km, im Durchschnitt rund 14 kWh/100 km, siehe Abbildung 2–4), liegen die hier ermittelten Stromverbräuche mit 22,2 bzw. 18,6 kWh/100 km deutlich darüber.

Bei der Interpretation dieses Ergebnisses muss allerdings berücksichtigt werden, dass sich die Fahrzeuge des Modellversuches zu einem großen Teil nicht im Alltagseinsatz befanden und vielfach von oft wechselnden Nutzern gefahren wurden, deren erste Priorität nicht notwendigerweise eine energieeffiziente Fahrweise war. Der Stromverbrauch ist daher nicht in Korrelation zu Normverbräuchen zu setzen, die beispielsweise mit dem neuen europäischen Fahrzyklus (NEFZ) ermittelt worden sind.

7 Fazit

Es wurde deutlich, dass eine Bewertung der Emissionseffekte der Elektromobilität – selbst bei Beschränkung der Betrachtungsebenen – sehr komplex ist und durchaus kontroverse Ergebnisse möglich sind.

Dies liegt auf der einen Seite an den Eingangsparametern, die abhängig von den getroffenen Annahmen beträchtliche Spannweiten aufweisen können. Hervorzuheben ist hier der Einfluss verschiedener Fahrprofile sowie die Abweichung von Normangaben und Praxiswerten. Die Problematik zusätzlicher Stromverbraucher an Bord von BEV wird in der wissenschaftlichen Debatte möglicherweise nicht ausreichend behandelt, zumal Langzeit-Praxiserfahrungen noch rar sind. Auch hinsichtlich des wichtigsten Parameters, des Emissionsfaktors der Stromerzeugung, ergeben sich je nach Betrachtung aus der Strommix- oder der Grenzkraftwerksperspektive erhebliche Abweichungen. Festzuhalten bleibt, dass bei Annahme des deutschen Strommix von allen untersuchten Studien ein Emissionsvorteil für Elektrofahrzeuge festgestellt wird, der jedoch höchst unterschiedlich ausfällt.

Auf der anderen Seite wird klar, dass die Emissionseffekte der Elektromobilität im Gesamtsystem nicht nur von technischen Parametern, sondern ganz wesentlich auch vom regulatorischen Rahmenwerk abhängen können:

Falls Elektrofahrzeuge weiterhin – unabhängig von den tatsächlichen Emissionen – als Nullemissionsfahrzeuge auf die Flottenverbräuche der Hersteller angerechnet werden, könnte dies unter dem Strich zu Mehremissionen im Gesamtsystem führen. Andererseits könnte das europäische Emissionshandelssystem – eine rigide Steuerung vorausgesetzt – dafür sorgen, dass sämtliche Mehremissionen durch Elektrofahrzeuge an anderer Stelle eingespart werden.

Auch für den vermeintlichen Königsweg, die Ladung mit Ökostrom, ergeben sich Fallstricke durch den regulatorischen Rahmen: Werden bestehende Ökostromkapazitäten einfach nur umgewidmet oder herkömmlicher Strom durch Zertifikate „vergrünt“, so wird der zusätzliche Strombedarf letztlich doch durch die – meist fossilen – Grenzkraftwerke gedeckt. Nur wenn ausreichend zusätzlicher Strom aus EE erzeugt wird, kann die weitgehende Emissionsfreiheit von Elektrofahrzeugen erreicht werden. Da hierdurch jedoch Mehrkosten entstehen, wird es nicht automatisch dazu kommen. Deshalb ist nicht zuletzt der Gesetzgeber gefordert, die technische Entwicklung der Elektromobilität durch die Schaffung eines geeigneten rechtlichen Rahmens zu begleiten.

Literatur

- [AG Energiebilanzen] Arbeitsgruppe Energiebilanzen e.V.: „Bilanzen 1990–2009“.
<http://www.ag-energiebilanzen.de>, Zugriff 21.06.2011.
- [Blesl et al. 2009] Blesl, M. et al.: „Entwicklungsstand und Perspektiven der Elektromobilität“. Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung, Universität Stuttgart (IER), 2009.
http://elib.uni-stuttgart.de/opus/volltexte/2010/5218/pdf/Elektromobilitaet_Endbericht_20100322.pdf,
Zugriff 21.06.2011.
- [BMU 2008] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU; Hg.): „Weiterentwicklung der Ausbaustrategie Erneuerbare Energien – Leitstudie 2008“, 2008.
<http://www.bmu.de/files/pdfs/allgemein/application/pdf/leitstudie2008.pdf>, Zugriff 21.06.2011.
- [BMU 2009] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU; Hg.): „Langfristszenarien und Strategien für den Ausbau erneuerbarer Energien in Deutschland unter Berücksichtigung der europäischen und globalen Entwicklung – Leitszenario 2009“, 2009.
http://www.bmu.de/files/pdfs/allgemein/application/pdf/leitszenario2009_bf.pdf
- [BMU 2011] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU): „Erneuerbar mobil – Marktfähige Lösungen für eine klimafreundliche Elektromobilität“, 2011.
<http://www.pt-elektromobilitaet.de/mediathek/dateien/broschuere-erneuerbar-mobil-1.pdf>,
- [Daimler 2008] Daimler AG/Optiresource Foundation: „Optiresource–Car online“, 2008.
<http://www2.daimler.com/sustainability/optiresource/index.htm>; Zugriff 23.08.2011.
- [Engel 2007] Engel, T.: „Plug–in Hybrids. Studie zur Abschätzung des Potentials zur Reduktion der CO₂–Emissionen im PKW–Verkehr bei verstärkter Nutzung von elektrischen Antrieben im Zu–

- sammenhang mit Plug-in-Hybrid Fahrzeugen“. Deutsche Gesellschaft für Solarenergie; Bundesverband Solare Mobilität (Hg.), 2007.
- [EU 2009] Europäische Union/Europäisches Parlament und Rat: „Verordnung Nr. 443/2009 zur Festsetzung von Emissionsnormen für neue Personenkraftwagen im Rahmen des Gesamtkonzepts der Gemeinschaft zur Verringerung der CO₂-Emissionen von Personenkraftwagen und leichten Nutzfahrzeugen“, 23.04.2009.
- <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2009:140:0001:0015:DE:PDF>, Zugriff 21.06.2011.
- [Helmers 2010] Helmers, E.: „Bewertung der Umwelteffizienz moderner Autoantriebe – auf dem Weg vom Diesel-Pkw-Boom zu Elektroautos“, in: Umweltwissenschaften und Schadstoffforschung 22/5, 2010, S. 564–578.
- <http://www.springerlink.com/content/c3hkxq73812x4t26/fulltext.pdf>, Zugriff 28.06.2011.
- [Helms et al. 2010] Helms, H. et al: “Electric vehicle and plug-in hybrid energy efficiency and life cycle emissions”, in: Empa (Hg.): Tagungsband des 18. Transport and Air Pollution Symposiums, Dübendorf, 18.–19.5 2010.
- [http://www.ifeu.de/verkehrundumwelt/pdf/Helms%20et%20al.%20\(2010\)%20Electric%20vehicles%20\(TAP%20conference%20paper\)%20final.pdf](http://www.ifeu.de/verkehrundumwelt/pdf/Helms%20et%20al.%20(2010)%20Electric%20vehicles%20(TAP%20conference%20paper)%20final.pdf), Zugriff 21.06.2011.
- [Horst et al. 2009] Horst, J. et al.: „Auswirkungen von Elektroautos auf den Kraftwerkspark und die CO₂-Emissionen in Deutschland“, WWF Deutschland (Hg.), 2009.
- <http://www.wwf.de/downloads/publikationsdatenbank/ddd/30496>, Zugriff 21.06.2011.
- [IER/RWI/ZEW 2009] IER/RWI/ZEW: „Die Entwicklung der Energiemärkte bis 2030 – Energieprognose 2009“, 2009.
- http://www.rwi-essen.de/media/content/pages/publikationen/rwi-projektberichte/PB_Energieprognose-2009.pdf, Zugriff 28.06.2011 .

- [JEC 2007] Joint Research Centre/EUCAR/CONCAWE (JEC): "Well-to-Wheels analysis of future automotive fuels and powertrains in the European context", Version 2c, 2007.
- [Knörr 2010] Knörr, W.: „Transport Emission Model“ (TREMODO), Version 4.17., 2010.
- [Öko-Institut 2009] Öko-Institut e.V.: „Globales Emissions-Modell Integrierter Systeme (GEMIS)“ version 4.5.0.0, 2009.
<http://www.oeko.de/service/gemis/de/archive.htm>, Zugriff 21.06.2011.
- [Pehnt 2010] Pehnt, M.: „Elektromobilität und erneuerbare Energien“, in: Müller, T. (Hg.): 20 Jahre Recht der Erneuerbaren Energien. Tagungsband der 7. Würzburger Gespräche zum Umwelternergierecht, Würzburg, 13.–14.10.2010.
[http://www.ifeu.de/verkehrundumwelt/pdf/Pehnt%20\(2010\)_%20Erneuerbare%20Energien%20und%20Elektromobilitaet%20final.pdf](http://www.ifeu.de/verkehrundumwelt/pdf/Pehnt%20(2010)_%20Erneuerbare%20Energien%20und%20Elektromobilitaet%20final.pdf), Zugriff 21.06.2011.
- [Pehnt et al. 2011] Pehnt, M. et al.: „Elektroautos in einer von erneuerbaren Energien geprägten Energiewirtschaft“, in: Zeitschrift für Energiewirtschaft, online erschienen am 07.05.2011.
<http://www.springerlink.com/content/a156165p51827682/fulltext.pdf>, Zugriff 21.06.2011
- [Ramanathan u. Carmichael 2008] Ramanathan, V.; Carmichael, G.: "Global and regional climate changes due to black carbon", in: Nature Geoscience 1, S. 221–227, 2008.
- [Renewbility 2009a] Öko-Institut/Deutsches Ins: „Stoffstromanalyse – Nachhaltige Mobilität im Kontext erneuerbarer Energien bis 2030. Endbericht Teil 1 – Methodik und Datenbasis“.
http://www.renewbility.de/fileadmin/download/endbericht_renewbility_teil1V1.pdf, Zugriff 21.06.2011
- [Renewbility 2009b] Öko-Institut/Deutsches Ins: „Stoffstromanalyse – Nachhaltige Mobilität im Kontext erneuerbarer Energien bis 2030. Endbericht Teil 2 – Szenarioprozess und Szenarioergebnisse“.
http://www.renewbility.de/fileadmin/download/endbericht_renewbility_teil2V1.pdf, Zugriff 21.06.2011

- [Richter u. Lindenberger 2010] Richter, J.; Lindenberger, D.: „Potenziale der Elektromobilität bis 2050 – Eine szenarienbasierte Analyse der Wirtschaftlichkeit, Umweltauswirkungen und Systemintegration“. Energiewirtschaftliches Institut an der Universität zu Köln (EWI), 2010.
- [Schulz 2005] Schulz, Walter: „Die Entwicklung der Energiemärkte bis zum Jahr 2030“, 2005.
- [UBA 2009] Umweltbundesamt (UBA): „Entwicklung der spezifischen Kohlendioxid-Emissionen des deutschen Strommix 1990–2007“, April 2009, aktualisiert März 2011.
www.umweltbundesamt.de/energie/archiv/co2-strommix.pdf, Zugriff 21.06.2011
- [Wagner et al. 2011] Wagner, M. et al.: „Energetische Quantifizierung des Heizenergiebedarfs einer Elektrofahrzeugflotte“, in: Energiewirtschaftliche Tagesfragen, 61/8, S. 38–41, 2011.
- [Wietschel u. Bünger 2010] Wietschel, M.; Bünger, U.: „Vergleich von Strom und Wasserstoff als CO₂-freie Endenergieträger“, Studie im Auftrag der RWE AG. Fraunhofer ISI; Ludwig-Bölkow-Systemtechnik, 2010.
www.isi.fraunhofer.de/isi-de/e/.../Endbericht_H2_vs_Strom-final.pdf, Zugriff 02.07.2011

Anhang: Übersicht über die untersuchten Studien

Blesl et al./ IER Uni Stuttgart

<p>Titel: „Entwicklungsstand und Perspektiven der Elektromobilität“ [Blesl et al. 2009].</p> <p>Autoren/Herausgeber: Blesl et al./Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung, Universität Stuttgart (IER).</p> <p>Allgemein: Die Studie untersucht „verschiedene Varianten elektrischer und hybrid-elektrischer Fahrzeugantriebe im PKW-Bereich“ hinsichtlich Kosten einzelner Antriebskomponenten, Mobilitätskosten, CO₂-Emissionen und CO₂-Vermeidungskosten für verschiedene Nutzerprofile, jeweils im Vergleich mit einem konventionellen PKW mit Otto- oder Dieselmotor (S.1).</p> <p>Zeithorizont: Heute, 2030</p> <p>Ansatz: Emissionen im Betrieb; Einzelfahrzeuge. Zusätzlich Untersuchung des Potenzials der Elektromobilität zur Lastregelung.</p>							
<p>Fahrprofile: Drei verschiedene Fahrprofile untersucht:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Hausfrau/mann: 60% innerorts, 40% außerorts • Pendler/in: 34% innerorts, 66% außerorts <p>Geschäftsreisende/r: 20% innerorts, 80% außerorts</p>							
<p>BEV: Kleinwagen und Kompaktfahrzeug, hypothetisch. Auslegung: Reichweite min. 75 bzw. 200 km, Leistung 45/77 KW (S. 28). Keine Angaben zur Datenherkunft.</p> <p>Nebenverbraucher wie Heizung etc. explizit nicht berücksichtigt (S. 33).</p>							
<p>CV: Smart Fortwo Benzin, VW Golf Diesel. WtW-Emissionen für heute basierend auf Herstellerangaben +10% Aufschlag zur besseren Annäherung an tatsächliche Verbräuche. Für 2030 Verbrauchsminderung von 21% gegenüber heutigen Werten (S. 32).</p>							
<p>Stromerzeugung: Strommix DE 2007 nach [UBA 2009]; Strommix 2030 nach [IER/RWI/ZEW 2009].</p>							
BEV-Verbrauch (kWh/100 km)		CV Emissionen WtW (g/km)			Stromerzeugung (g CO ₂ /kWh)		
Heute							
	io.	12		Benzin	Diesel	Mix DE 2007 288	
	ao.	18		komb.*	148		-
	komb.*	16					
	io.	15		io.			
	ao.	23		ao.	-		176
	komb.*	20		komb.*			
2030							
	io.	10		Benzin	Diesel	Mix DE 2030 288	
	ao.	14		komb.*	110		-
	komb.*	13					
	io.	12		io.			
	ao.	18		ao.	-		139
	komb.*	16		komb.*			

*nach Fahrprofil „Pendler/in“

Engel/DGS;BSM

<p>Titel: „Plug-in Hybrids. Studie zur Abschätzung des Potentials zur Reduktion der CO₂-Emissionen im PKW-Verkehr bei verstärkter Nutzung von elektrischen Antrieben im Zusammenhang mit Plug-in-Hybrid Fahrzeugen.“</p> <p>Autor / Herausgeber: Engel, T. / Deutsche Gesellschaft für Solarenergie; Bundesverband Solare Mobilität.</p> <p>Allgemein: Trotz Fokus auf PHEV werden auch BEV analysiert. Zeithorizont ca. 2006.</p> <p>Ansatz: Emissionen im Betrieb (WtW); Einzelfahrzeuge und Gesamtpotential.</p>							
<p>Fahrprofil: Angepasstes Fahrprofil von 60% innerorts und 40% außerorts für Kleinwagen, bzw. 34% innerorts/66% außerorts für Kompakt-Fahrzeuge.</p>							
<p>BEV: Kleinwagen: Typisch, angelehnt an real existierende Klein-BEV; inkl. 15% Ladeverluste [Engel 2007:32]. Kompakt: Renault Kangoo Cleanova II (PHEV) im rein elektrischen Betriebsmodus.</p>							
<p>CV: Beruhen auf Durchschnittsverbrauch der Neuzulassungen 2006 im jeweiligen Fahrzeugsegment, Benzin- und Dieselfahrzeuge kombiniert. Hierauf werden 17% Well-to-Tank-Emissionen addiert, und die Emissionen auf das o.g. klassenspezifische Fahrprofil umgerechnet.</p>							
<p>Stromerzeugung: DE-Strommix nach [Öko-Institut 2004]; EE- und EE/KWK-Mixe, diverse Einzel-KW. Orientiert an [Öko-Institut 2004] und [DPG 2005]; inkl. Vorketten.</p>							
BEV-Verbrauch (kWh/100 km)		CV Emissionen WtW (g CO ₂ /km)		Stromerzeugung (g CO ₂ /kWh)			
Heute							
	io.	12		Benzin u. Diesel			
	ao.	18		io.	213	Mix DE	650
	komb.	14		ao.	147	Fossil-Mix	900
			komb.	186	EE-Mix	30	
	io.	17			258	Braunkohle	1100
	ao.	20		komb.	180	Gas (GuD)	450
	komb.	15			207	Gas (KWK)	250
						EE+KWK	200
						Wind	20

Helmers / Umweltcampus FH Trier

<p>Titel: „Bewertung der Umwelteffizienz moderner Autoantriebe – auf dem Weg vom Diesel-Pkw-Boom zu Elektroautos“ [Helmers 2010].</p> <p>Autor: Helmers, E./Umweltcampus FH Trier.</p> <p>Allgemein: Die Studie untersucht den feststellbaren Diesel-Pkw-Boom auf seine Umweltwirkungen hin, hinterfragt kritisch „die CO₂-Reduktion bei den deutschen Verkehrsemissionen der vergangenen Jahre“ und betrachtet „vor diesem Hintergrund (...) die Umwelteffizienz von Elektroautos (...). Direkte und indirekte Emissionen (CO₂, NO_x, PM10, SO₂) von Pkw mit Verbrennungsmotor einerseits und von Elektro-Pkw andererseits werden berechnet und verglichen.“ (S. 1).</p> <p>Zeithorizont: Heute.</p> <p>Ansatz: Emissionen im Betrieb; Einzelfahrzeuge. Außerdem lokale Schadstoffemissionen. Geht als einzige Studie auf den klimarelevanten rußbedingten Strahlungsantrieb durch Diesel-PKW (und auch durch die fossile Stromproduktion) ein.</p>						
<p>Fahrprofile: Praxistests angelehnt an NEFZ.</p>						
<p>BEV: Smart Fortwo Electric Drive. Verbrauchsdaten aus “AutoBild”-Test (S. 574).</p>						
<p>CV: Smart Fortwo Benzin, Smart Fortwo Diesel. Tank-to-Wheel-Emissionen nach Verbrauchsdaten aus “AutoBild”-Tests (S. 574).</p>						
<p>Stromerzeugung: Strommix DE derzeitig, EE-Mix, keine Datenquellen angegeben.</p>						
BEV-Verbrauch (kWh/100 km)			CV Emissionen TtW (g/km)		Stromerzeugung (g CO ₂ /kWh)	
Heute						
	komb.	12		Benzin 132 (TtW!)	Diesel 145/ 180* (TtW!)	Mix DE 600 EE-Mix 30

*35 g Aufschlag durch rußbedingten Strahlungsantrieb (Diesel nach EURO5-Norm; S. 574)

Helms et al.; Pehnt et al. / IFEU

<p>Titel : „Electric vehicle and plug-in hybrid energy efficiency and life cycle emissions [Helms et al. 2010]“; „Elektroautos in einer von erneuerbaren Energien geprägten Energiewirtschaft“ [Pehnt et al. 2011]; „Elektromobilität und erneuerbare Energien“ [Pehnt 2010]</p> <p>Autoren: Helms, H. et al.; Pehnt, M./ Institut für Energie- und Umweltforschung (IFEU)</p> <p>Allgemein: Drei Arbeiten, die das Thema von verschiedenen Seiten beleuchten, aber weitestgehend gleichen Annahmen zum Emissionsvergleich treffen. Hauptreferenz in diesem Bericht ist [Helms et al. 2010], wo speziell die Emissionen im Betrieb von Elektro-, Hybrid- und Verbrennungsfahrzeugen verglichen werden. Ein Fokus liegt auf der möglichst exakten Modellierung von BEV- und PHEV-Verbräuchen.</p> <p>Zeithorizont: Heute, 2030</p> <p>Ansatz: Lebenszyklus-Analyse; Einzelfahrzeuge und Gesamtpotential. Außerdem lokale Schadstoffemissionen. Alternative Betrachtungsweisen der Emissionseffekte: Emissionshandel, Zusätzlichkeit von EE-Strom, Flottenobergrenzen.</p> <p>Fahrprofile: Im Emissionsvergleich Fahrprofile „Urban“ (70% innerorts, 20% außerorts, 10% Autobahn) und „Average“ (29% innerorts, 39% außerorts, 32% Autobahn).</p> <p>BEV: Modellierung der Verbräuche für verschiedene Fahrzeugparameter und Fahrprofile . Zusätzliche Verbraucher berücksichtigt, Ladeverluste i.H.v. 10% berücksichtigt ([Helms et al. 2010: 115–116]).</p> <p>CV: Typische Benziner und Diesel mit EURO 5-Norm, abgeleitet aus Neuzulassungsdaten nach [Knörr 2010] ([Helms et al. 2010], S.119).</p> <p>Stromerzeugung: Strommix DE derzeitig und 2030, div. Einzelkraftwerks-Optionen ([Pehnt et al. 2011:7]). Datenquelle: Eigene Berechnungen inkl. Vorketten mittels Kraftwerksparkmodellierung und Ökobilanzierung ([Pehnt et al. 2011:3–4]). Bearbeitung der Grenzkraftwerks-Perspektive für drei verschiedene Ladeszenarien in [Pehnt 2010] und [Pehnt et al. 2011].</p>					
BEV-Verbrauch (kWh/100 km)	CV Emissionen WtW (g/km)			Stromerzeugung (g CO ₂ /kWh)	
Heute					
 io.* 20,4 ao.* 20,8 AB* 24,9	 komb. 200	Benzin	Diesel	Mix DE	630
				Marginalmix 1 ²²	590
				Marginalmix 2 ²³	710
				Marginalmix 3 ²⁴	40
				Steinkohle (neu)	930
		Gas (GuD)	360		
		Wind	15		
2030					
k.A.	k.A.			Mix DE	420

*jeweils inklusive durchschnittlicher zusätzlicher Verbraucher (Heizung, Klima etc.)

²² Unkontrolliertes Laden nach letzter Fahrt

²³ Kontrolliertes Laden

²⁴ Kontrolliertes Laden und zusätzliche EE-Kapazitäten

Horst et al./WWF

<p>Titel: „Auswirkungen von Elektroautos auf den Kraftwerkspark und die CO₂-Emissionen in Deutschland“ [Horst et al. 2009]</p> <p>Autoren/Herausgeber: Horst, J. et al., Institut für ZukunftsEnergieSysteme(IZES)/ WWF Deutschland</p> <p>Allgemein: Kurzstudie im Auftrag des WWF Deutschland. Es werden „die bisherigen Argumente für Elektromobilität zusammengetragen und kritisch diskutiert“. Schätzt ab, „welche Größenordnung des Stromverbrauchs mittelfristig relevant wird“, und untersucht die „Auswirkungen auf das Strombereitstellungssystem sowie die CO₂-Emissionen auch im Lichte gesetzlicher Rahmenbedingungen“. (S. 6)</p> <p>Zeithorizont: Ca. 2009.</p> <p>Ansatz: Emissionen im Betrieb; Einzelfahrzeuge und Gesamtpotential. Zudem alternative Betrachtung der Emissionseffekte in Verbindung mit Emissionshandelssystem, Flottenobergrenzen, Zusätzlichkeit von Ökostrom, EU-Ausbauziele für EE.</p>						
<p>Fahrprofil: Nicht näher spezifiziert.</p>						
<p>BEV: Kompaktklasse (typisch). Korridor von 12–20 kWh/100km (kombiniert) wird aufgestellt, plus 15% Ladeverluste und 3% Transportverluste. Unterscheidet hier auch nach verwendeter Batterietechnologie (S. 32).</p> <p>In Szenarien wird später mit einem festen Wert von 20 kWh/100km gerechnet (z.B. S. 40), welcher auch für diesen Bericht übernommen wurde.</p>						
<p>CV: Typische Kompaktfahrzeuge; Benzinler sowie Diesel mit Partikelfilter (S. 32). WtW-Emissionen kombiniert nach [Daimler 2008]/[JEC 2007].</p>						
<p>Stromerzeugung: Strommix DE 2008 und div. Einzelkraftwerke, inkl. Vorketten und sonstiger Treibhausgase; nach [Öko-Institut 2009]. Geht explizit auf die Grenzkraftwerks-Problematik ein (S. 34).</p>						
BEV-Verbrauch (kWh/100 km)		CV Emissionen WtW (g/km)			Stromerzeugung (g CO ₂ /kWh)	
Heute						
	komb.	20		Benzin komb. 160	Diesel 155	Mix DE 625 Kohle neu 750 Kohle alt 900

Öko-Institut u. DLR / Renewbility

<p>Titel: „RENEWBILITY – „Stoffstromanalyse nachhaltige Mobilität im Kontext erneuerbarer Energien bis 2030“. Zweiteiliger Abschlussbericht ([Renewbility 2009a]; [Renewbility 2009b]).</p> <p>Herausgeber: Öko-Institut e.V.; DLR-Institut für Verkehrsforschung.</p> <p>Allgemein: Endbericht des gleichnamigen Projekts im Auftrag des BMU. Will u.a die aus Maßnahmen einer zukünftigen nachhaltigen Verkehrspolitik resultierenden Treibhausgasemissionen und Energieverbräuche quantifizieren [Renewbility 2009a:5].</p> <p>Zeithorizonte: 2010, 2020, 2030.</p> <p>Ansatz: Lebenszyklus-Analyse; Einzelfahrzeuge und Gesamtpotential.</p>								
<p>Fahrprofile: Nicht spezifiziert.</p>								
<p>BEV: Verschiedene Literaturquellen herangezogen, u.a. [Engel 2007]; Hinweis auf begrenzte Vergleichbarkeit der Verbrauchswerte. Daraus Berechnung typischer Werte für Klein- und Kompakt-BEV, die Ladeverluste beinhalten sollen. Einzige Studie, die außerorts höhere Verbräuche annimmt als innerorts.</p>								
<p>CV: Kombiniert (NEFZ), nach segmentspezifischen Neuzulassungsdaten 2005, WtW. Es werden Szenarien zur Entwicklung der Kraftstoffverbräuche erstellt, aus denen sich aber keine absoluten Werte für bestimmte Zeitpunkte ableiten lassen.</p>								
<p>Stromerzeugung: Strommix DE 2010, 2020, 2030 nach [BMU 2008]. EE-Mix 2010, 2020, 2030 ohne Datenquelle.</p>								
BEV-Verbrauch (kWh/100 km)		CV Emissionen WtW (g/km)			Stromerzeugung (g CO ₂ /kWh)			
Heute								
	io.	15		Benzin	Diesel	Mix DE	596	
	ao.	14		komb.	147			116
	AB	22						
	io.	20		Benzin	Diesel	EE-Mix	57	
	ao.	17		komb.	181			154
	AB	28						
2020								
k.A.		95 (TtW, nach EU-Flottengrenze)			Mix DE	546		
2030								
k.A.		k.A.			Mix DE	388		

Richter u. Lindenberger/EWI Uni Köln

<p>Titel: „Potenziale der Elektromobilität bis 2050 – Eine szenarienbasierte Analyse der Wirtschaftlichkeit, Umweltauswirkungen und Systemintegration“ [Richter u. Lindenberger 2010].</p> <p>Autoren: Richter, J; Lindenberger, D./Energiewirtschaftliches Institut an der Univ. zu Köln (EWI).</p> <p>Allgemein: Die Studie will „das zukünftige Potenzial batteriebetriebener elektrischer PKW ... bewerten“. Untersucht werden Wechselwirkungen mit dem Stromerzeugungssystem, Umwelteffekte einer Substitution von Verbrennungsmotoren, Kostenvorteile und zusätzliche stromnetz-basierte Einnahmequellen für Fahrzeughalter, sowie Auswirkungen auf die Förderung und Netzintegration erneuerbarer Energien. „Die modellgestützte Analyse erfolgt szenarienbasiert ... hinsichtlich politischer und wirtschaftlicher Rahmenbedingungen.“ (S.1–2). Die Studie wurde unterstützt von der Initiative „Elektrofahrzeuge Intelligent Am Netz“ (ELAN 2020).</p> <p>Zeithorizont: 2010–2050, z.T. in Fünfjahresschritten.</p> <p>Ansatz: Emissionen im Betrieb; Einzelfahrzeuge und Gesamtpotential. Außerdem lokale Schadstoffemissionen. Alternative Betrachtungsweisen der Emissionseffekte: Emissionshandel, Zusatzlichkeit des EE-Stroms</p>						
<p>Fahrprofile: Praxistests angelehnt an NEFZ.</p>						
<p>BEV: Kleinwagen vergleichbar z.B. mit Smart Fortwo Electric Drive; Kompaktfahrzeug typisch (Serienreife 2013 angenommen). Verbrauchsangaben bezogen auf NEFZ (S.22).</p>						
<p>CV: Kleinwagen: Smart Fortwo Benzin und Diesel. WtW-Emissionen für heute auf Basis von Herstellerangaben (NEFZ). Für die Zukunft eigene Berechnungen auf Basis von [JEC 2007] und [Schulz 2005]. Steigender Biokraftstoff-Anteil berücksichtigt</p>						
<p>Stromerzeugung: Strommix DE nach eigenen Berechnungen, inkl. Vorketten. Zwei Szenarien werden aufgestellt („Hoher Gasanteil“ und „EE und Kernkraft“ – im Rahmen dieses Berichts wurde das erstgenannte Szenario berücksichtigt, das einen Ausstieg aus der Kernkraftnutzung vorsieht).</p>						
BEV-Verbrauch (kWh/100 km)		CV Emissionen WtW (g/km)			Stromerzeugung (g CO ₂ /kWh)	
Heute/2015						
 komb.	13	 komb.	Benzin 116	Diesel 102	Mix DE 2010	543
 komb.	20	 komb.	164	147		
2020						
 k.A.	k.A.	 komb.	Benzin 111	Diesel 97	Mix DE 2020	500
 k.A.	k.A.	 komb.	157	139		
2030						
 k.A.	k.A.	 komb.	Benzin 106	Diesel 93	Mix DE 2030	330
 k.A.	k.A.	 komb.	149	134		
2050						
 k.A.	k.A.	 komb.	Benzin 97	Diesel 85	Mix DE 2050	237
 k.A.	k.A.	 komb.	137	123		

Wietschel u. Bünger/ Fraunhofer ISI; Ludwig-Bölkow-Systemtechnik

<p>Titel: „Vergleich von Strom und Wasserstoff als CO₂-freie Endenergieträger – Studie im Auftrag der RWE AG“ [Wietschel u. Bünger 2010].</p> <p>Autoren/Herausgeber: Wietschel, M.; Bünger, U./Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung (Fraunhofer ISI); Ludwig-Bölkow-Systemtechnik GmbH.</p> <p>Allgemein: Ziel ist, „für ausgewählte Anwendungen die Verwendung von Strom und Wasserstoff miteinander zu vergleichen. (...) Dies schließt auch den Vergleich zu den bisherigen konventionellen Lösungen ein.“ Dabei stehen „die Aspekte der Wirtschaftlichkeit, der Treibhausgasemissionen und der Energieeffizienz bei mobilen Anwendungen und der Hausenergieversorgung im Fokus der Untersuchungen“ (S.9).</p> <p>Zeithorizont: Heute/2015, 2030</p> <p>Ansatz: Lebenszyklus-Analyse; Einzelfahrzeuge. PKW und Nutzfahrzeuge.</p>						
<p>Fahrprofil: CV-Kleinwagen nach NEFZ, sonst nicht weiter spezifiziert.</p>						
<p>BEV: Kleinwagen und Kompaktfahrzeuge; typischer Verbrauch (für beide Fahrzeugsegmente und beide Zeithorizonte gleicher Verbrauch angenommen; S. 91–94).</p>						
<p>CV: Kleinwagen: Für 2015 Smart Fortwo Diesel und Benziner. WtW-Emissionen nach NEFZ; Stand 2009 (S. 89). Für 2030 keine Datenquelle angegeben.</p> <p>Kompaktklasse: Typische Diesel und Benziner. Für 2015 WtW-Emissionen nach [JEC 2007]. Für 2030 nach [RWE 2010] (S. 92).</p> <p>Hinweis: Für 2030 werden statt konventioneller Benziner jeweils Benzin-Hybridfahrzeuge angenommen (S. 90).</p>						
<p>Stromerzeugung: Strommix DE 2008 auf Basis von [AG Energiebilanzen] u. [Öko-Institut 2009]; Strommix DE 2015 und 2030 nach [BMU 2009] (S. 69). Windenergie wird mit 0g angegeben.</p>						
BEV-Verbrauch (kWh/100 km)			CV Emissionen WtW (g/km)			Stromerzeugung (g CO ₂ /kWh)
Heute/2015						
	komb.	15		Benzin komb. 125	Diesel 110	Mix DE 2008 527
	komb.	15		komb. 165	160	Mix DE 2015 427
2030						
	komb.	15		Benzin-Hybrid komb. 80	Diesel 85	Mix DE 2030 233
	komb.	15		komb. 110	120	