

Ökobilanzieller Vergleich von Elektrofahrzeugen und Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor

Auswertung Umweltauswirkungen der Betriebsphase

Olga Kanz¹, Prof. Dr. Jonanna May², Prof. Dr. Eberhard Waffenschmidt²

Zusammenfassung

In dieser Ausarbeitung soll ein Elektrofahrzeug sowie ein vergleichbares Referenzfahrzeug mit konventionellem Benzinantrieb auf ihre Klimawirkung untersucht werden. Als Teil einer kompletten Ökobilanz wird in diesem Paper die Betriebsphase am Beispiel des Modells Elektro-Smart analysiert. Mit Hilfe einer Simulation in Excel wird gezeigt, dass in der Nutzungsphase trotz Betrachtung der Stromerzeugung in Deutschland das Elektromodell um rund 38 % weniger Treibhausgase emittiert. Die Sensibilitätsanalyse beweist dabei die Relevanz des Stromursprungs sowie der Wahl der Ladefenster. Bei der Grenzbetrachtung Umweltzeihens „Grüner Strom“ zur Lastdeckung des Elektromobils konnte die größte Reduktion der Treibhausgasemissionen identifiziert werden.

Stichwörter

Elektromobilität — Öko-Bilanz — Smart — Simulation — Erneuerbare Energien

Masterprojekt vorgelegt am 15. September 2018

¹TH Köln, Erneuerbare Energien (M.Sc.), Fakultät für Anlagen, Energie- und Maschinensysteme, Köln, Deutschland

²Betreuer der TH Köln, Fakultät für Informations-, Medien- und Elektrotechnik, Institut für Energietechnik, Köln, Deutschland

Inhaltsverzeichnis

1.	Einleitung	1
1.1	Motivation	1
1.2	Methodik der Sachbilanz im Betrieb.....	1
2.	Annahmen und Bilanzierungsgrenzen	2
2.1	Bilanzierungsgrenzen	2
2.2	Mobilitätsverhalten	2
3.	Simulation der Nutzungsphase	2
3.1	Elektro-Smart	2
	Generierung des Ladeprofils	2
3.2	Benzin-Smart.....	3
4.	Sensibilitäts- und Fehleranalyse	3
4.1	Anpassung der Ladezeiten des Deutschen Strommix	3
4.2	Simulation alternativer Stromerzeugung.....	3
4.3	Fehleranalyse	3
5.	Ergebnisse	3
5.1	Einordnung in die Gesamtbilanz	3
5.2	Diskussion alternativer Stromerzeugung.....	4
6.	Fazit	4

1. Einleitung

1.1 Motivation

Aktuell besteht im Allgemeinen kein Konsens darüber, ob Elektroautos insgesamt klimafreundlicher sind als vergleichbare Verbrenner [1]. Diese Tatsache legitimiert die hohe Anzahl an Studien zu diesem Thema, die eine Vielfalt an Ergebnissen hinterlassen [1]. Es besteht hier die Notwendigkeit, sich bei einer Öko-Bilanz konkret auf ein Fahrzeug unter Berücksichtigung spezifischer, regionaler Gegebenheiten zu fokussieren und diese zu referenzieren, um realistische Klimabelastung zu identifizieren. Aus diesem Grund werden in dieser Arbeit die Klimawirkungen eines Elektromobils im Vergleich mit einem Referenzfahrzeugs am Beispiel des Modells (Elektro-)Smart untersucht und die Möglichkeiten der ökologischen Verbesserungen dieser Prozesse in Deutschland aufgeschlüsselt. [2,3]

1.2 Methodik der Sachbilanz im Betrieb

Der Schwerpunkt der Ausarbeitung liegt bei der Simulation der Nutzungsphase der Fahrzeuge. Dabei werden Strom- sowie Kraftstoffverbräuche der Betriebsphase analysiert und miteinander verglichen. Beim Elektroauto wird ein Ladeprofil mit zeitlich aufgelöster Stromnachfrage modelliert. Diese besteht aus unterschiedlichen Annahmen zu den zurückgelegten Distanzen, spezifischen Stromverbräuchen sowie der zeitlichen Struktur der Beladung (Abb.1).



Abbildung 1: Systemgrenzen der Betriebsphase der Ökobilanz

Unter Betrachtung der direkten sowie indirekten Vorketten des zum Laden benötigten Stroms kann anschließend anhand der Treibhausgasemissionen die Klimabelastung beim Laden identifiziert werden. Analog dazu wird der Benzinverbrauch des konventionell betriebenen Smart-Modells unter Berücksichtigung des Kraftstoffursprungs auf die Klimawirkung untersucht. Dies basiert auf Datenbank GEMIS, sowie SMARD-Daten ergänzt durch verlässliche Quellen von offiziellen Einrichtungen, wie dem statistischen Bundesamt. Die Simulation wird bei Excel durchgeführt und mit Indikator der Treibhausgasemissionen (Einheit kg oder tCO₂eq) bewertet.

2. Annahmen und Bilanzierungsgrenzen

2.1 Bilanzierungsgrenzen

Smart bietet aufgrund vergleichbar guter Datenbasis eine ausreichende Informationsgrundlage für eine Öko-Bilanz. Aus den Angaben zu den durchschnittlichen gefahrenen Maximaldistanzen mit dem Fahrzeug sowie dem angenommenen Mobilitätsprofil des Fahrzeugnutzers ergibt sich die Lebensdauer von 9,12 Jahren (bezogen auf 130000 km) [4]. Die anfallenden Emissionen werden einschließlich der linearen sowie indirekten Vorketten, ausgeschlossen wirtschaftlicher Verflechtungen, über die gesamte Lebensdauer bilanziert [5]. Die Vorgehensweise der Ökobilanz ist in der Norm DIN ISE 14044 klar definiert. Der Reparaturen, sowie Abnutzung der Materialien werden in der Gesamtbilanz, jedoch nicht beim Betrieb betrachtet. Es kann ebenso angenommen werden, dass der Akku im Betrieb nicht ausgetauscht werden muss. [3]

2.2 Mobilitätsverhalten

Realistische Annahmen zu gängigen Mobilitätsmustern in Deutschland werden anhand empirisch gesammelter Daten der Studie "Mobilität in Deutschland" (MiD) getroffen. Dabei werden werktäglich zurückgelegten Wegstrecken, Anzahl der Strecken pro Tag, Verteilungen der Arbeitsbeginn- und Arbeitsendzeiten sowie das Standverhalten der einzelnen Fahrzeuge berücksichtigt. Der MiD-Schnitt fährt 39 km werktags sowie samstags und am Sonntag mit 50 % Wahrscheinlichkeit die tägliche Strecke [6]. Da die Nutzergruppe „Early Adopter von Elektrofahrzeugen“ laut DLR meist ein hohes Einkommen aufweist, wird die Annahme getroffen, dass die Urlaubsfahrten und Wochenendausflüge mit einem anderen Pkw des Haushalts durchgeführt werden. [7]

3. Simulation der Nutzungsphase

3.1 Elektro-Smart

Generierung des Ladeprofils

Laut Hersteller liegt der Stromverbrauch bei 13,5 kWh/ 100 km[8], jedoch weisen Testfahrten einen deutlich höheren Verbrauch des Elektro-Smart auf [9]. Ursache ist einerseits die geringere Effizienz von Lithium-Akkus bei realistischen Temperaturen und andererseits der erhöhte Stromverbrauch der Heizung des Innenraums. Der Extraenergie- und Kraftstoffverbrauch der Fahrzeuge kann jedoch in Abhängigkeit des Fahrzeuggewichts und anderer Fahrzeugparameter mit einem physikbasierten Verbrauchsmodell des Instituts für Energie- und Umweltforschung recht genau nachgebaut werden [10]. So können unter Berücksichtigung der Heizung sowie Beleuchtung bei gemischtem Verkehr erhöhter Verbrauch von rund 20 kWh/ 100 km festgestellt werden [3]. Der Elektro-Smart hat eine Ladeleistung von max. 3,7 kW [8]. Die Ankunftszeit eines Fahrzeugs nach der letzten Fahrt weist auf den wahrscheinlichen Ladebeginn. Bei täglichen Direktladung bei der Ankunft von der Arbeit kann im Schnitt mit Ladebeginn um 17:30 gerechnet werden [10,11]. Während der Ladezeit wird von einer Ladung mit maximalen Ladeleistung ausgegangen und Verluste zwischen Kraftwerk und Fahrzeugbatterie berücksichtigt [7,12].

Analyse der Stromerzeugung beim „Lademix“

Zur Analyse werden Einspeiseprofile von erneuerbaren und konventionellen Kraftwerken in 15-minütiger Auflösung für das Referenzjahr 2017 in das Modell integriert. Als Grundlage wurden die Strommarktdaten von SMARD der Bundesnetzagentur benutzt [13]. Die Einspeisung wurde nach 12 unterschiedlichen Stromerzeugungsanlagen sortiert und mit den jeweiligen Vorketten deren Klimawirkung analysiert. Als Ergebnis des Modells liegen die exakten spezifischen Emissionen pro kWh Stroms da. Hierbei werden die Im- und Exporte jedoch ausgeschlossen (Abb.2) [14].

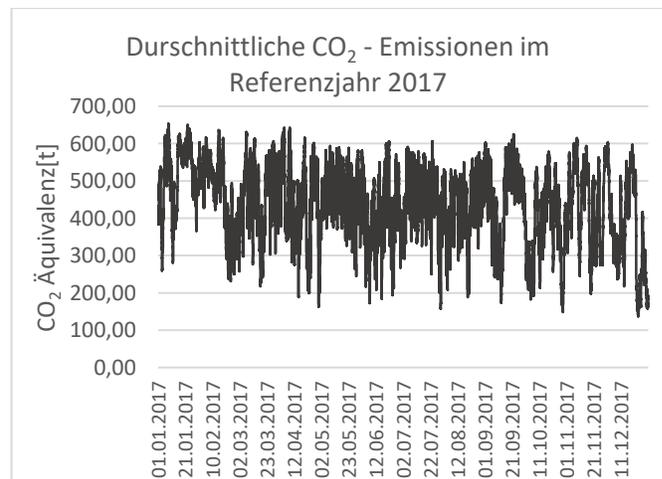


Abbildung 2: Klimabelastung der Stromproduktion im Jahr 2017

Die Ermittlung der Emissionsfaktoren der Vorkette konnte anhand einzelner Module bei GaBi auf der Basis der Datenbank GEMIS erfolgen [15]. Des Weiteren wurde im Modell ein Trend zum mäßigen Ausbau regenerativer Energien für die Betriebsdauer prognostiziert [16,17]. Diese Annahme führt zu einer tendenziell konservativen Betrachtung der Bilanzierung und ermöglicht eine bessere Vergleichbarkeit der Ergebnisse.

Simulationsergebnis

Die Simulation weist im Normalbetrieb eine Belastung von 10,22 t CO₂eq über die Lebensdauer des Elektroautos auf. Dies bedeutet spezifisch 0,072 kgCO₂eq Produktion pro km.

3.2 Benzin-Smart

Kraftstoffverbrauch

Empirische Messungen beim typischen Fahrprofil suggerieren einen Benzinverbrauch von 5,5 l/100 km des Smarts [9]. Die Klimabelastung ist dabei aus den direkten Emissionen bei der Verbrennung (Tank-to-Wheel) sowie den zusätzlich anfallenden indirekten Emissionen in der Vorkette bei der Produktion des Kraftstoffes (Well-to-Tank) zusammengesetzt. Der Klimaeffekt wird auf Basis von GEMIS bei GaBi nachgebaut und in das Excelmodell exportiert [15]. Die Simulationsprognose erfolgt unter Anrechnung zunehmender Emissionsminderungen aufgrund der Beimischung von Biokraftstoffen, entsprechend der geltenden Vorgaben. [18]

Simulationsergebnis

Pro Liter Benzin fallen im Schnitt 2,88 kgCO₂eq an. Im Fahrbetrieb emittiert der Smart insgesamt 19,9 tCO₂eq, ergo 0,152 kgCO₂eq pro km.

4. Sensibilitäts- und Fehleranalyse

4.1 Anpassung der Ladezeiten des Deutschen Strommix

Unterschiedliche Lademanagementsysteme können künftig helfen das Laden ökologischer zu gestalten [13,16]. Dabei konnten beim täglichen Laden über das Referenzjahr unterschiedliche Klimawirkung einzelner Ladefenster festgestellt werden (Abb. 3)

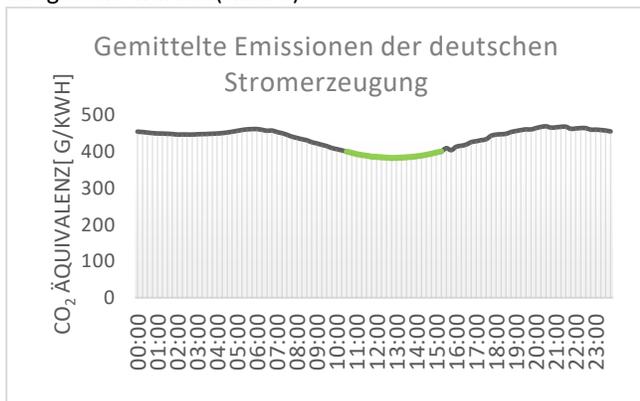


Abbildung 3: Zeitliche Betrachtung durchschnittlicher THG-Emissionen im Referenzjahr 2017

Bei täglichem Ladebeginn um 11:45 fallen beispielsweise für das Fahrprofil die geringsten Emissionen von 1,01 tCO₂eq an. Dies ist 30% weniger, als die Emissionen des „Feierabendladers“, der 1,33 tCO₂eq verursacht. Die letzte betrachtete Ladezeit ist der „Frühlader“ der vor der Arbeit um 06:30 lädt. Bei dem Szenario wurden 1,3 tCO₂eq im Referenzjahr festgestellt (Abb.4). Es darf jedoch nicht vergessen werden, dass die Bilanzierung sich lediglich auf ein einzelnes Auto bezieht. Bei höheren Durchdringungsraten ist dieser Ansatz aufgrund erhöhter Netzbelastung unmöglich.

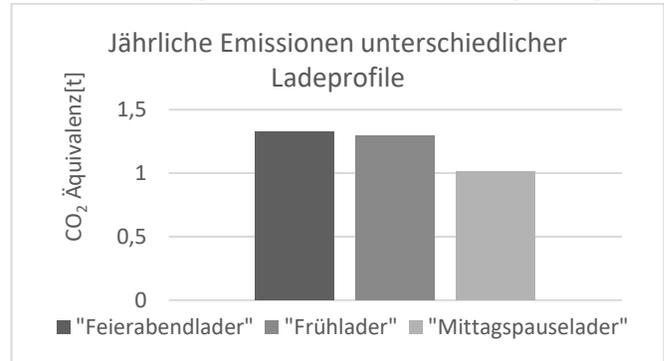


Abbildung 4: Vergleich unterschiedlicher Ladezeiten im Referenzjahr 2017

4.2 Simulation alternativer Stromerzeugung

Die zweite Möglichkeit der Parameteranpassung ist die Betrachtung alternativer Stromerzeugung. Wenn man einen Grenzfall „Eigene PV-Anlage“ betrachtet und davon ausgeht, dass der Smart lediglich mit PV- Strom geladen wird, ist eine Treibhausbelastung von 1.456 kgCO₂eq über den Simulationszeitraum zu erwarten. Ein anderer Grenzfall ist das Laden mit „Grünem Strom“ (Umweltzeichen) mit durchschnittlich 0,18 kgCO₂eq/kWh. Dabei fallen lediglich 468 kgCO₂eq über die Lebensdauer an [17].

4.3 Fehleranalyse

Eine Ökobilanz mit unterschiedlichen Datenquellen ist behaftet mit Fehlern. Explizit die Nutzungsphase ist aufgrund notwendiger Prognosen zur Stromerzeugung, sowie Annahmen der Ladeprofile sehr vage. Qualitative Einschätzung der Unsicherheit ist aufgrund der hohen Anzahl der Annahmen unmöglich. Konservativer Ansatz der Prognosen kann jedoch oft Fehlerfortpflanzung reduzieren.

5. Ergebnisse

5.1 Einordnung in die Gesamtbilanz

Im Vergleich zu Herstellungs- und Recyclingphase der Fahrzeuge, bietet die Nutzungsphase mit derzeitigem Strommix in Deutschland einen deutlichen ökologischen Vorteil gegenüber dem Verbrenner. Insgesamt werden über den gesamten Lebenszyklus des Elektro-Smarts beim „Normalbetrieb“ ca. 13.600 kgCO₂eq ausgestoßen. Die Herstellung macht einen Anteil von ca. 25 % aus. Nach der

Verrechnung der aus dem Recycling resultierenden Gutschriften von ca. 2.000 kgCO₂eq-Äquivalenz resultiert ein Wert von ca. 11.600 kgCO₂eq. Der Verbrenner hingegen ist mit ca. 21.825 kgCO₂eq deutlich schädlicher für die Umwelt (Abb. 5).

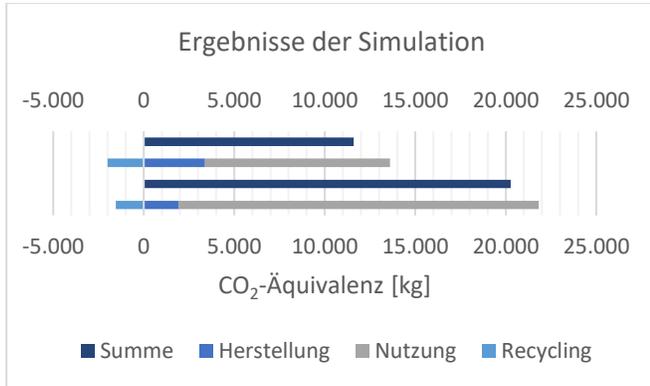


Abbildung 5: Ergebnisse des Szenarios „Normalfahrer“ (o. E-Smart, u. Benzin-Smart)

5.2 Diskussion alternativer Stromerzeugung

Die Auswirkungen der Sensibilitätsanalyse im Betrieb zeigen, dass durch smartes Laden im EU Strom-Mix in der Mittagssonne 30 % der THG - Emissionen eingespart werden. Die Wirkungsabschätzung des Stromursprungs weist noch größeren Effekt auf die THG-Emissionen auf. Bei dem Bezug von „Grünem Strom“ fallen die Emissionswerte über den gesamten Lebenszyklus auf ca. 3850 kg kgCO₂eq (Abb.6). Anteilig machen die Emissionen des Elektro-Smartes in diesem Szenario lediglich noch ca. 18 % der Emissionen des Benzin-Smartes aus.

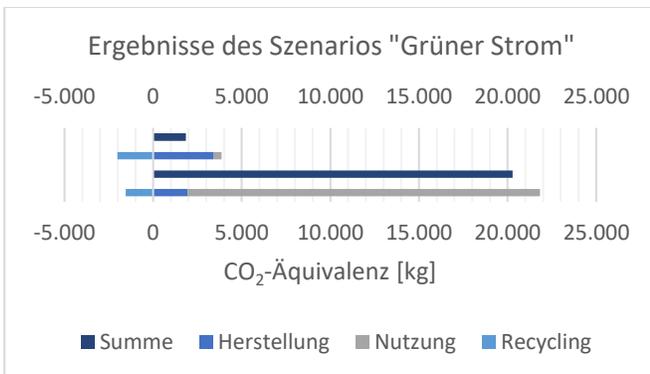


Abbildung 6: Ergebnisse des Szenarios „Grüner Strom“ (o. E-Smart, u. Benzin-Smart)

Die erhöhte Umweltbelastung in den Bereichen Herstellung der Lithium-Ionen-Batterie ist auf die Komplexität der Herstellung zurückzuführen. Unsicher ist, ob dieser Prozess umweltfreundlicher gestaltet werden kann. Es besteht ebenso ein Forschungsbedarf zur Effizienzerhöhung der Entsorgungswege der Batterie, was sich auf die Ökobilanz positiv auswirken kann. [3]

6. Fazit

Es lässt sich festhalten, dass der Elektro-Smart während des Herstellungsprozesses zunächst größere Klimabelastung als ein Vergleichsfahrzeug mit konventionellem Antrieb aufweist. Über die Betriebsphase verbessert sich die Ökobilanz allerdings stark, dass diese am Ende des Lebenszyklus doch positiv gegenüber Benziner ausfällt. Der Betrieb des Elektrofahrzeugs hat allerdings noch Optimierungspotenzial. Durch Zeitmanagement beim Laden kann beispielsweise 30% der Klimabelastung reduziert werden. Generell wird jedoch durch Ausbau Erneuerbarer Energien künftig wachsender ökologischen Vorteil des Elektrofahrzeugs gegenüber dem Verbrenner erwartet.

Literatur

- [1] Benjamin Greiner: Sektorale Emissionspfade in Stromerzeugung, Entwicklungsvorhaben des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit: „Erstellung und Begleitung des Klimaschutzplans 2050“ (FKZ UM 15 41 1860) (2016)
- [2] Primary energy efficiency of alternative powertrains in vehicles, Ahnan, M., 2001
- [3] Helmers, E., Dietz, J. u. Hartard, S.: Electric car life cycle assessment based on real-world mileage and the electric conversion scenario. The International Journal of Life Cycle Assessment 22 (2017) 1, S. 15–30
- [4] KBA: Fahrzeugzulassungen (FZ). Besitzumschreibungen und Ausserbetriebsetzung von Kraftfahrzeugen und Kraftfahrzeuganhängern nach Fahrzeugalter. FZ16 (2016)
- [5] Electricity-specific emission factors for grid electricity, Brander, M., Sood, A., Wylie, C., Houghton, A. u. Lovell, J., 2011
- [6] Kurzreport Mobilität in Deutschland. Kurzreport Verkehrsaufkommen – Struktur – Trends, infas, Bonn 2018
- [7] FrenzelJarass, Trommer: Erstanwender von Elektrofahrzeugen in Deutschland. Nutzerprofile, Anschaffung, Fahrzeugnutzung (2015)
- [8] smart fortwo electric drive (inkl. Batterie), ADAC Test, 2013
- [9] Fisch und Fischl GmbH: Deutscher Sprintforum, 2018. https://www.sprintmonitor.de/de/uebersicht/32-Smart/0-Alle_Modelle.html, abgerufen am: 12.09.2018
- [10] H. Helms et al.: Umweltbilanzen Elektromobilität. Grundlagenbericht, ifeu – Institut für Energie- und Umweltforschung, Heidelberg 2011; H. Helms et al.: Weiterentwicklung und vertiefte Analyse der Umweltbilanz von Elektrofahrzeugen, Umweltbundesamt, 2016.
- [11] J. Linsen, A. Schulz, S. Mischinger, H. Maas: Netzintegration von Fahrzeugen mit elektrifizierten Antriebssystemen in bestehende und zukünftige Energieversorgungsstrukturen. Auswertung des Ladeverhaltens (2013) ISBN 978-3-89336-811-2
- [12] Wieland, T., Reiter, M., Schmutzger, E., Fickert, L., Fabian, J. u. Schmied, R.: Probabilistische Methode zur Modellierung des Ladeverhaltens von Elektroautos an-hand gemessener Daten elektrischer Ladestationen – Auslastungsanalysen von Ladestationen unter Berücksichtigung des Standorts zur Planung von elektrischen Stromnetzen. e & i Elektrotechnik und Informationstechnik 132 (2015) 3, S. 160–167
- [13] Dr. Thomas Müller: SMARD- Strommarktdaten, 2018. <https://www.smard.de>, abgerufen am: 12.09.2018
- [14] Electricity-specific emission factors for grid electricity, Brander, M., Sood, A., Wylie, C., Houghton, A. u. Lovell, J., 2011
- [15] Uwe R. Fritsche: Bericht zu GEMIS -Datenbank, Version 4.94. Vorkette Stromsektor 2020, 2018. <http://iinas.org/gemis-de.html>
- [16] Umweltbundesamt: CO₂-Emissionen pro Kilowattstunde Strom sinken weiter, 2018. <https://www.umweltbundesamt.de/themen/co2-emissionen-pro-kilowattstunde-strom-sinken>
- [17] Strom 2030. Langfristige Trends – Aufgaben für die kommenden Jahre, BMWi, 2017
- [18] Knitschky, G.: CNG und LPG – Potenziale dieser Energieträger auf dem Weg zu einer nachhaltigeren Energieversorgung des Straßenverkehrs. AZ Z14/SeV/288.3/1179/UI40 (2013)