

Ökobilanzieller Vergleich von Elektrofahrzeugen und Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor

Eine Betrachtung der Herstellungsphase beider Fahrzeuge und deren Umweltauswirkungen hinsichtlich ihres Global Warming Potential

Philip Schürheck
TH Köln, Betzdorfer Str. 2, 50679 Köln
15. September 2018

Abstract Einen Hauptfeiler der von der Bundesregierung angestrebten Mobilitätswende stellt der Umstieg von Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor auf Elektrofahrzeuge dar. Kritiker der Elektromobilität unterstellen dem Lebenszyklus der genannten Elektrofahrzeuge allerdings häufig umweltschädlicher zu sein als der eines herkömmlichen Fahrzeuges. Dies soll auf die emissionsintensive Herstellung der Lithium-Ionen-Batterie zurückzuführen sein. Die nachfolgende Arbeit hat sich mit dem Herstellungsprozess zweier Smart-Varianten beschäftigt, einem Elektro-Smart und einem Smart mit Benzinmotor. Das Resultat der gegebenen Untersuchung zeigt, dass der Herstellungsprozess des Elektrofahrzeuges zwar deutlich Emissionsreicher ist, die gesamte Ökobilanz allerdings positiv ausfällt und sich dieser Effekt mit dem Anstieg an erneuerbaren Energien im deutschen Strommix noch verstärkt.

INHALT

I.	Einleitung.....	1
II.	Ausgangssituation.....	1
III.	Zielsetzung und Systemgrenzen	1
IV.	Die Sachbilanz.....	1
A.	GaBi.....	2
B.	Simulation des Herstellungsprozesses	2
V.	Die Wirkungsabschätzung	3
A.	Herstellungsprozess	3
B.	Ganzheitliche Betrachtung.....	4
VI.	Auswertung.....	4
A.	Gewonnene Erkenntnisse.....	4
B.	Fehleranalyse	4
VII.	Fazit und Ausblick.....	4

I. EINLEITUNG

Die Bundesregierung strebt im Rahmen der Energiewende die damit zusammenhängende Mobilitätswende an. Diese basiert hauptsächlich auf der Substitution von Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor durch sogenannte Battery Electric Vehicles (BEV) bzw. Elektrofahrzeuge. Dabei stellt sich allerdings die Frage, ob ein solches BEV über den gesamten Lebenszyklus überhaupt klimafreundlicher ist als ein herkömmliches Fahrzeug mit Verbrennungsmotor. Diese Frage soll durch die nachfolgenden Betrachtungen beantwortet werden. Dabei wurde sich in dieser Arbeit auf den Herstellungsprozess der einzelnen Fahrzeugkomponenten konzentriert. Für die Datenauswertung wird sich dabei an die normgerechte Durchführung einer Ökobilanz gehalten. Abschließend soll ein Vergleich der beiden Herstellungsprozesse eine finale Aussage über die Umweltschädlichkeit beider Fahrzeuge in diesem Abschnitt des Lebenszyklus ermöglichen.

II. AUSGANGSSITUATION

Um eine vergleichende Ökobilanz zwischen Elektrofahrzeug und Fahrzeug mit Verbrennungsmotor durchführen zu können, bedarf es der Auswahl zweier geeigneter Referenzfahrzeuge. Um die Vergleichbarkeit hinsichtlich Größe, Ausstattung und Gewicht zu gewährleisten bezieht sich diese Ökobilanz auf den Smart Fortwo. Diesen gibt es sowohl als rein elektrische Variante, als auch als Fahrzeug mit Benzinmotor. Die Ausmaße der verglichenen Smart-Varianten sind identisch, sodass ein Vergleich sehr aussagekräftig ist. Die so gewonnenen Ergebnisse lassen sich dann einfach auf größere Autos anwenden, da die verbauten Komponenten zumindest ähnlich sind. Lediglich die verbauten Materialmengen müssen nach oben skaliert werden.

Die Durchführung der Ökobilanz orientiert sich an den Normen DIN ISE 14044 und DIN ISE 14040. Insgesamt besteht sie aus vier Teilen, der Definition von Zielsetzung und Systemgrenzen, der Sachbilanz, der Wirkungsabschätzung und der abschließenden Auswertung.

III. ZIELSETZUNG UND SYSTEMGRENZEN

Zuerst muss eine klare Zielsetzung definiert werden. Hierbei ist es besonders wichtig den Untersuchungsrahmen der Ökobilanz an den vorher definierten Zielen auszumachen. So kann eine Systemgrenze definiert werden, die dem Untersuchungsrahmen entspricht. In diesem Fall lag das Ziel darin einen ökobilanziellen Vergleich zwischen Elektrofahrzeug und Fahrzeug mit Verbrennungsmotor durchzuführen. Die gewählte Systemgrenze beinhaltet deswegen alle verbauten Materialien und deren Rohstoffgewinnung sowie etwaige Transportprozesse für den Herstellungsprozess beider Fahrzeugtypen.

IV. DIE SACHBILANZ

In der Sachbilanzphase der Erstellung einer Ökobilanz werden möglichst qualitative und quantitative Daten über alle Prozesse innerhalb der Systemgrenze gesammelt. Die untersuchten Fahrzeugvarianten wurden separiert voneinander be-

trachtet. Im ersten Schritt müssen diverse Teilsysteme definiert werden, die untersucht werden müssen. Hierbei handelt es sich um die einzelnen Komponenten des jeweiligen Fahrzeuges. Für den Elektro-Smart wurden dabei nach [1] die folgenden Komponenten berücksichtigt.

- Lithium-Ionen-Batterie
- Elektromotor
- Ladegerät
- PowerpAC
- Batterie-Management-System
- Antriebsstrang
- Karosserie und Fahrwerk
- Bleibatterie
- Getriebe

Auch für den Smart mit Verbrennungsmotor wurde eine Auswahl der verbauten Komponenten nach [1] definiert.

- Benzinmotor
- Karosserie und Fahrwerk
- Getriebe
- Bleibatterie
- Antriebsstrang

Für die so im Vorfeld definierten Komponenten wurde aus der gleichen Quelle eine Materialzusammensetzung entnommen. Mit Hilfe der jeweiligen Materialzusammensetzung kann der Herstellungsprozess der entsprechenden Komponente rekonstruiert werden. Hierzu wurde die Ökobilanzierungssoftware GaBi herangezogen.

A. GaBi

GaBi ist eine Software zur Simulation von Energie- und Massenströmen in unterschiedlichen Lebenszyklusphasen eines Produktes. Mit deren Hilfe kann eine Ökobilanz des entsprechenden Produktes erstellt werden. Die Herstellung der beiden Smart-Varianten wurde dabei komplett mit Hilfe von GaBi simuliert. Dafür wurde die Datenbank „Education Database 2017“ herangezogen, die von der Firma thinkstep zur Verfügung gestellt wurde.

In der GaBi-Datenbank findet man zahlreiche vorgefertigte „Prozesse“, die unterschiedlichen Schritte im Herstellungsprozess eines Produktes beschreiben. Innerhalb eines jeden Prozesses sind wiederum „Flows“ definiert, die die zahlreichen Material- und Arbeitsflüsse des jeweiligen Prozesses definieren. Die einzelnen Flows werden ihrerseits unterteilt in Input- und Output-Flows. Aus diesen setzen sich die fertigen Prozesse dann zusammen. Datengrundlage dieser vorgefertigten Prozesse sind Untersuchungen diverser staatlicher und privater Institutionen, die mit thinkstep zusammenarbeiten.

B. Simulation des Herstellungsprozesses

Als erstes wurden die im Vorfeld genannten Komponenten der beiden Fahrzeuge hinsichtlich ihrer Materialzusammensetzung untersucht und deren Herstellung mittels GaBi simuliert.

In jedem so untersuchten System gibt es den gleichen Aufbau. Als erstes wurden die entsprechenden Prozesse zur Herstellung des jeweiligen Ausgangsmaterials untersucht. Anschließend wurden diese Prozesse mit solchen verbunden, die eine Bearbeitung der Ausgangsmaterialien beschreiben. Außerdem wurde jeweils der Bezug von thermischer und elektrischer Energie im jeweiligen Herstellungsland simuliert. Abschließend wurde der Transport der fertigen Komponente vom entsprechenden Herstellungsland nach Hambach in Frankreich modelliert. Dort werden beide Varianten des Smarts gefertigt.

Eine ausführliche Beschreibung des Systemaufbaus jeder Komponente würde den Umfang der Ausarbeitung überschreiten. Stattdessen wird beispielhaft der Systemaufbau zur Simulation des in der Lithium-Ionen-Batterie verbauten Aluminiums beschrieben.

Für die Simulation des in der Batterie verbauten Aluminium wurde der Prozess „Aluminium Sheet Mix“ herangezogen. Dieser beschreibt die Herstellung von Aluminiumblechen von der Rohstoffgewinnung bis zum fertigen Blech. Um die Bearbeitung des Aluminiums mit einzubeziehen wird der Prozess „Aluminium sheet deep drawing“ verwendet. Dieser simuliert einen Stanz- bzw. Tiefziehprozess. Zur Modellierung der benötigten thermischen und elektrischen Prozessenergie wurden entsprechende Prozesse eingebettet. Da die Batterie in China gefertigt wird, wurde der Prozess „CH: Electricity Mix“ angelegt. Dieser simuliert den chinesischen Strommix und den entsprechenden Ausstoß von ca. 1 kg CO₂-Äquivalent bei einem Strombezug von einer kWh. [2] Ähnliches gilt für den Bezug von thermischer Prozessenergie. Hierfür wurde der Prozess „CH: Thermal energy from natural gas“ verwendet. Dieser beschreibt die Generierung von thermischer Energie aus Erdgas und berücksichtigt dabei die lokalen Gegebenheiten in China. Hierunter fallen z.B. Gasherkunft und Gaszusammensetzung.

Um den Transport der fertigen Batterie zu simulieren wurde die Strecke zwischen dem Herstellungsort im chinesischen Luoyang und dem Smart-Werk in Hambach recherchiert. Hierfür wurde das Tool SeaRates LP verwendet. Diese ermittelt die kürzeste Lieferstrecke zwischen zwei angegebenen Orten. Dabei muss eine Strecke auf der Straße von 1.500 m und ein Seeweg von ca. 19.400 km zurückgelegt werden. Hierfür wurden Prozesse zur Simulation der Kraftstoffverbräuche von Lastkraftwagen und Containerschiffen über die genannten Distanzen verwendet. Auch die Herstellung des verbrauchten Diesels sowie des Schweröls wurden in die Simulation mit einbezogen.

Auf diese Weise wurden alle im Vorfeld genannten Materialien der jeweiligen Komponenten sowohl für das Elektrofahrzeug als auch für das Fahrzeug mit Verbrennungsmotor simuliert. Es muss berücksichtigt werden, dass nicht alle Herstellungs- und Bearbeitungsprozesse der unterschiedlichen Materialien in der gegebenen Datenbank vorhanden waren. Da die Datengrundlage sich aber nicht auf zu viele unter-

schiedliche Quelle stützen sollte, wurde entschieden möglichst wenig andere Quellen außerhalb der GaBi-Datenbank zu verwenden.

V. DIE WIRKUNGSABSCHÄTZUNG

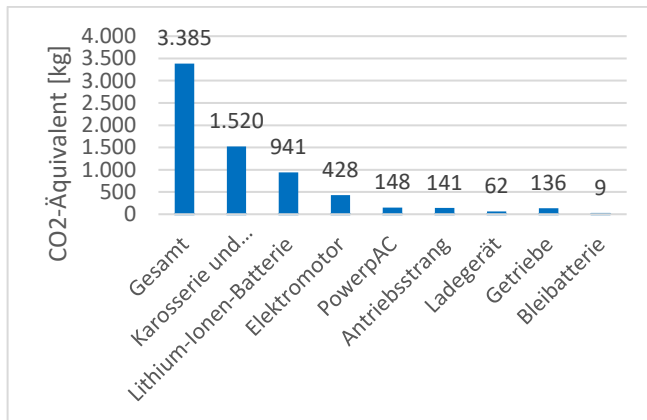
Die für diese Ökobilanz gewählte Wirkungskategorie ist dabei das Global Warming Potential des jeweiligen Fahrzeuges. Die Kategorie wird mittels des Wirkungsindikators Emission von CO₂-Äquivalenz bewertet. Anhand dieser Wirkungskategorie lässt sich der Vergleich der beiden Fahrzeugvarianten am besten durchführen.

A. Herstellungsprozess

Mit Hilfe von GaBi lassen sich die in der Sachbilanz gewonnenen Daten für die Herstellungsphase ganz einfach bilanzieren. Dafür können unterschiedlichste Bilanzierungsmethoden ausgewählt werden. In diesem Fall wurde sich an das vom europäischen Joint Research Centre veröffentlichte „International Reference Life Cycle Data System (ILCD) Handbook“ gehalten. Dieses beinhaltet Empfehlungen für eine Lebenszyklus-Einflussanalyse im europäischen Kontext [3]. So kann sowohl jeder einzeln simulierte Bestandteil, als auch das jeweilige Fahrzeug im Gesamten bilanziert werden.

Für den Elektro-Smart entstehen während des Herstellungsprozesses laut der in GaBi entworfenen Systeme sowie der verwendeten Bilanzierungsmethode insgesamt ca. 3.385 kg CO₂-Äquivalent. Die genaue Aufschlüsselung kann Abbildung 1 entnommen werden.

Abbildung 1: Global Warming Potential Elektro-Smart

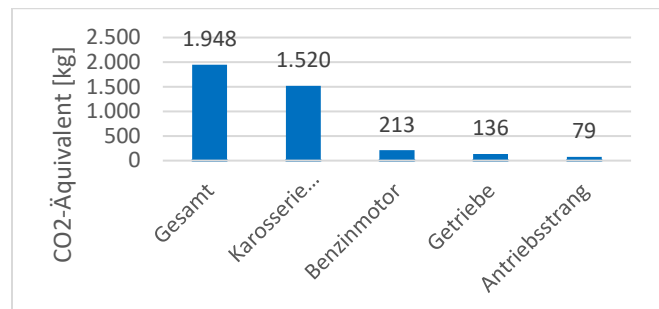


Es fällt auf, dass Karosserie und Fahrgestell mit einem prozentualen Anteil von ca. 45 % und insgesamt 1.520 kg CO₂-Äquivalent das größte Potenzial zur Klimaerwärmung beinhaltet. Dies ist vor allen Dingen darauf zurückzuführen, dass die Stahlproduktion ein sehr energieaufwendiger Prozess ist. Hier wird dementsprechend sehr viel CO₂-Äquivalent produziert. Ein weiterer Prozess, bei dem sehr viel CO₂-Äquivalent ausgestoßen wird ist die Herstellung der Lithium-Ionen-Batterie. Insgesamt beträgt der Ausstoß 941 kg und macht einen Anteil von 28 % des insgesamt emittierten CO₂-Äquivalents aus. Hier stellt sich vor allem die Herstellung der Aluminiumbleche als sehr CO₂-intensiv heraus. Zusammen macht die

Herstellung der Lithium-Ionen-Batterie sowie von Karosserie und Fahrwerk fast 75 % des emittierten CO₂-Äquivalents aus. Als drittgrößte Quelle von CO₂-Äquivalent stellt sich der Elektromotor mit einer emittierten Menge von 428 kg heraus. Zusammen mit PowerpAC, Antriebsstrang, Ladegerät, Getriebe und Batterie macht die Kombination die restlichen 25 % der emittierten Emissionsmenge aus. Die Bleibatterie hat sich dabei als am wenigsten CO₂-intensiv bei der Herstellung herausgestellt. Hierbei werden nur 9 kg CO₂-Äquivalent produziert.

Auch für den untersuchten Benzin-Smart wird im Folgenden eine Wirkungsabschätzung bezüglich der Wirkungskategorie Global Warming Potential stattfinden. Bei der Herstellung der betrachteten Smart-Variante entstehen insgesamt ca. 1.950 kg CO₂-Äquivalent. Die genaue Verteilung der Emission kann der nachfolgenden Abbildung entnommen werden.

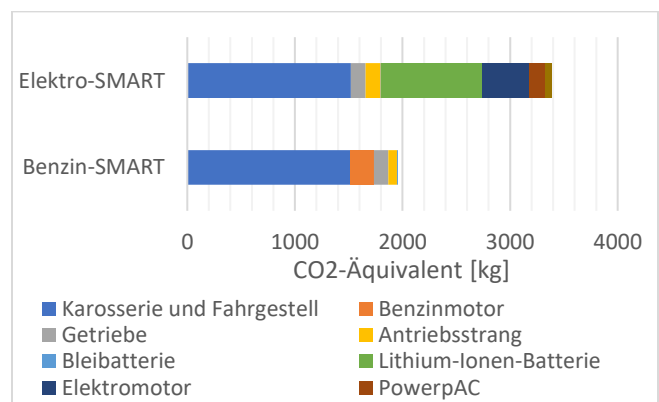
Abbildung 2: Global Warming Potential des Benzin-Smarts



Da für den Benzin-Smart der gleiche Verbund aus Karosserie und Fahrwerk verwendet wird, liegt die Emission von CO₂-Äquivalent auch hier bei 1.520 kg. Insgesamt machen Karosserie und Fahrwerk ca. 80 % der Gesamtemissionen aus. Bei der Herstellung des verbauten Benzinmotors fallen insgesamt 213 kg CO₂-Äquivalent an. Hier fällt die Herstellung des verbauten Aluminiums besonders ins Gewicht. Getriebe und Antriebsstrang machen mit insgesamt 136 kg und 79 kg den restlichen Anteil der Gesamtemission aus.

Beim Vergleich der beiden Smart-Varianten in Abbildung 3 fällt auf, dass der Elektro-Smart deutlich CO₂-intensiver in seiner Herstellung ist.

Abbildung 3: Vergleich des Global Warming Potentials der Smart-Varianten

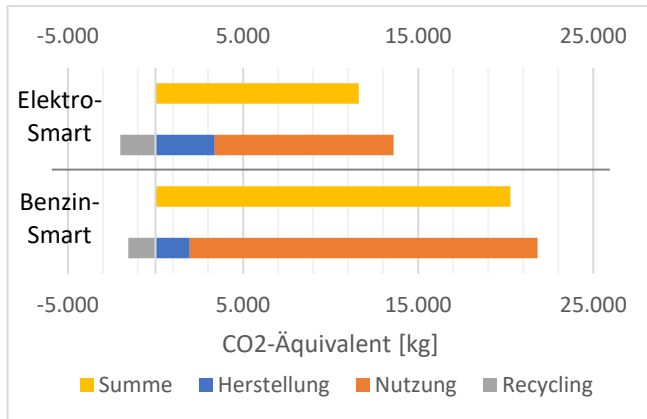


Hier spielt vor allem die Herstellung der Lithium-Ionen-Batterie eine sehr große Rolle. Doch auch die Herstellung des Elektromotors ist, verglichen zum Benzinmotor, deutlich stärker mit Emissionen behaftet.

B. Ganzheitliche Betrachtung

Um die gewonnenen Erkenntnisse auch mit den anderen Lebenszyklusphasen in Beziehung zu setzen, wird außerdem eine gesamtheitliche Betrachtung durchgeführt. Hier werden die Emissionen der drei Lebenszyklusphasen kumuliert untersucht. Für die Betriebsphase wurde dabei der Bezug von elektrischer Energie aus dem aktuellen deutschen Strommix angenommen. Außerdem wurde ermittelt wie hoch die Gutschriften sind, die durch das Recyceln von bestimmten Materialien verrechnet werden können. Die genaue Herleitung der Ergebnisse für die Betriebs- und Entsorgungsphase kann dem Abschlussbericht entnommen werden. Die kumulierte Betrachtung ist in Abbildung 4 dargestellt.

Abbildung 4: Ganzheitliche Betrachtung



Es kann festgehalten werden, dass die Emission von CO₂-Äquivalenten bei dem Elektrofahrzeug deutlich geringer ausfallen. Das lässt sich vor allem auf die geringeren Emissionswerte während der Betriebsphase zurückführen. Insgesamt fallen bei dem Elektrofahrzeug nach Verrechnung der Recycling-Gutschriften ca. 11.600 kg CO₂-Äquivalent an. Der Benzin-Smart ist mit einer Emission von ca. 21.825 kg CO₂-Äquivalent deutlich umweltschädlicher.

VI. AUSWERTUNG

Im Letzten Schritt werden die in der Wirkungsabschätzung gesammelten Ergebnisse ausgewertet.

A. Gewonnene Erkenntnisse

Es lässt sich festhalten, dass die Herstellung des Elektro-Smarts deutlich emissionsintensiver ist als die des Benzin-Smarts. Das lässt sich vor allem auf den Herstellungsprozess der Lithium-Ionen-Batterie zurückführen. Aber auch die Herstellung des restlichen Antriebsstranges des Elektro-Smarts, in dem auch der Elektromotor berücksichtigt wird, weist verglichen mit dem Benzin-Smart eine negative Bilanz auf.

Bezogen auf die jeweiligen Einzelteile lässt sich festhalten, dass die Herstellung des verbauten Stahls den jeweils größten Anteil des emittierten CO₂-Äquivalents ausmacht.

Betrachtet man den gesamten Lebenszyklus der beiden Fahrzeug-Varianten so fällt auf, dass die Herstellungsphase einen vergleichbar kleinen Teil des emittierten CO₂-Äquivalents verursacht. Am meisten Einsparpotenzial weist hier die Betriebsphase auf.

B. Fehleranalyse

Eine Ökobilanz ist auf Grund der großen Datenmenge sowie der unterschiedlichen Datenquellen oft behaftet mit Fehlern. In diesem Fall wird nur auf potenzielle Fehlerquellen während der Betrachtung des Herstellungsprozesses eingegangen.

Die Herstellung beider Fahrzeugvarianten wurde mittels GaBi simuliert. Hier liegt das größte Fehlerpotenzial. Da lediglich eine kostenlose Datenbank zur Verwendung an Universitäten etc. angewandt wurde, war die Auswahl der zu verwendenden Prozesse eingeschränkt. Dabei wurde versucht den Herstellungsprozess so genau wie möglich zu simulieren. Es bleibt aufgrund der eingeschränkten Auswahl an Prozessen aber nicht aus, dass einige Herstellungsschritte nicht berücksichtigt werden konnten.

VII. FAZIT UND AUSBLICK

Nach der Durchführung der Ökobilanz kann man abschließend festhalten, dass die Emissionswerte eines Elektro-Smarts über die gesamte Lebenszeit deutlich niedriger ausfallen, als die eines Benzin-Smarts.

Aus dieser Erkenntnis lässt sich auch schließen, dass die Ökobilanz von Elektrofahrzeugen generell besser ausfällt als die von Fahrzeugen mit Verbrennungsmotoren. Die verbauten Komponenten sind gleich oder zumindest ähnlich aufgebaut. Lediglich die Skalierung der verwendeten Materialien variiert mit der Fahrzeuggröße.

Außerdem wurde gezeigt, dass ein sehr großes Einsparpotenzial der ausgestoßenen Emissionen in der Betriebsphase zu finden ist. Da der Anteil erneuerbarer Energien im deutschen Strommix in den kommenden Jahren wohl steigen wird [4], kommt es wahrscheinlich zu noch größeren Differenzen bezüglich der ausgestoßenen Emissionen.

Das Potenzial zur Reduzierung des Emissionsausstoßes in der Herstellung ist als eher gering anzusehen.

Literaturangaben

- [1] Ökobilanzierung von Elektrofahrzeugen, Dietz, J., Helmers, E., Türk, O., Beringer, F., Brand, U. u. Walter, J., 2015
- [2] Erzeugungsportfolio 2014. CO₂-Belastung, snenergie, 2014
- [3] The International Reference Life Cycle Data System (ILCD) Handbook, Wolf, M.-A., Pant, R., Chomkhansri, K., Sala, S. u. Pennington, D., 2012
- [4] Energiewendeatlas - Deutschland 2030, Schmidt-Curreli, J., Knebel, A. u. Lawrenz, L., 2016