

Ökobilanz eines batterieelektrischen Fahrzeugs im Vergleich zu Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor

Bachelorarbeit

zur Erlangung des akademischen Grades „Bachelor of Science (B. Sc.)“ im Studiengang Wirtschaftsingenieur der Fakultät für Elektrotechnik und Informatik, Fakultät für Maschinenbau und der Wirtschaftswissenschaftlichen Fakultät der Leibniz Universität Hannover

vorgelegt von

Name: Zucht



Vorname: Leonard



Prüfer: Prof. Dr. M. H. Breitner

Hannover, den 30.06.2016

Inhaltsverzeichnis

Abstrakt	1
1. Einleitung.....	2
2. Der Automobilmarkt in Deutschland	3
3. Technologische Grundlagen	5
3.1 Funktionsweise und Aufbau von batterieelektrischen Fahrzeugen	5
3.2 Funktionsweise und Aufbau von Lithium-Ionen-Akkumulatoren	8
4. Relevanz der Elektromobilität für den Klimawandel	10
4.1 Ursachen und Bedeutung des Klimawandels.....	10
4.2 Treibhausgasemissionen in Deutschland	12
4.2.1 Anteil der Treibhausgasemissionen des Verkehrs	14
4.2.2 Relevanz von Elektrofahrzeugen für die deutsche Verkehrs- und Klimapolitik.....	15
5. Die Methodik der Ökobilanz nach DIN EN ISO 14040 und DIN EN ISO 14044	17
6. Verwendete Software zur Erstellung der Ökobilanz	21
7. Festlegung des Ziels und des Untersuchungsrahmens	23
7.1 Definition der Fahrzeugmodelle, der Produktsysteme und der funktionellen Einheit .	23
7.2 Grundlegende Annahmen und Einschränkungen für die Sachbilanz.....	27
7.3 Grundlegende Annahmen und Einschränkungen für die Wirkungsabschätzung	28
8. Sachbilanz.....	29
8.1 Fahrzeugherstellung.....	29
8.1.1 Materialbedarf der Fahrzeugherstellung	30
8.1.2 Energieträgerbedarf der Fahrzeugherstellung.....	37
8.1.3 Direkte Emissionen und Energiebedarf der Fahrzeugherstellung	40
8.2 Nutzung	44
8.2.1 Kraftstoff-/Stromverbräuche und direkte Emissionen der Nutzung	44
8.3 Bereitstellung der Materialien und Energieträger	46
8.3.1 Bereitstellung der Materialien für die Produktion.....	46
8.3.1 Bereitstellung der Energieträger für die Nutzung und die Produktion.....	51
8.4 Fahrzeugrecycling.....	57
8.4.1 Recycling der Fahrzeugmodelle ohne Akkumulator	57
8.4.2 Recycling des Akkumulators.....	58

9. Wirkungsabschätzung	60
10. Auswertung	66
10.1 Sensitivitätsanalyse	70
10.2 Vergleich mit einer anderen Studie	73
10.3 Beurteilung der Datenqualität	78
10.4 Zusammenfassung, Ausblick und Handlungsempfehlung	82
Literaturverzeichnis	85
Anhang.....	91

1. Einleitung

Wenn man die aktuelle mediale Berichterstattung verfolgt, wird man zwangsläufig mit einem Thema konfrontiert, welches gleichzeitig beunruhigend und verwirrend erscheint. Der Klimawandel ist in aller Munde und doch scheint er keinen direkten Einfluss auf unseren Alltag zu haben.

„Klimawandel ist die größte Herausforderung unserer Zeit [...]“.¹ Dieses Zitat von UNO-Generalsekretär Ban Ki-moon aus dem Jahr 2015 verdeutlicht, dass umgehendes und entschlossenes Handeln notwendig ist, um den Klimawandel und seine Folgen eindämmen zu können.

Folglich ist auch die Entwicklung von alternativen Mobilitätskonzepten notwendig, welche die allgemeine Mobilitätsnachfrage stillen und dem Anspruch nach umweltschonender und nachhaltiger Technologie nachkommen können. Elektrofahrzeuge scheinen auf Grund ihres emissionslosen Antriebs als saubere Technologie der Zukunft beide Anforderungen erfüllen zu können. Doch lassen sich die über den Lebensweg von Automobilen auftretenden Umweltwirkungen nicht nur anhand der bei der Nutzung ausgestoßenen Emissionen bewerten. Vorgelagerte und nachgelagerte Prozesse, wie die Produktion oder die Energiebereitstellung, müssen für eine ganzheitliche Analyse der Umweltwirkungen eines Fahrzeugs mit berücksichtigt werden. Für Elektrofahrzeuge ist insbesondere die Erzeugung von Strom relevant, da der deutsche Strombedarf zu einem großen Teil aus fossilen Energieträgern wie Kohle gedeckt wird.

Ein etabliertes Werkzeug, um die gesamten Umweltwirkungen eines Produkts bewerten zu können, sind sogenannte Ökobilanzen. Mit diesen lassen sich die verschiedenen Umweltwirkungen, welche während des gesamten Lebenswegs eines Produkts entstehen, analysieren und auf das Produkt beziehen.

Ökobilanzen können daher als geeignetes Werkzeug betrachtet werden, um die Umweltrelevanz von Elektrofahrzeugen zu bewerten.

In dieser Arbeit wird eine Ökobilanz für ein Elektrofahrzeug der Kompaktklasse im Vergleich zu entsprechenden Fahrzeugen mit Benzin- und Dieselmotor erstellt. Ziel ist es, die Umweltwirkung der verschiedenen Fahrzeuge zu bewerten und zu analysieren, ob Elektrofahrzeuge heute als im Vergleich zu konventionellen Fahrzeugen umweltschonende Technologie angesehen werden können.

Nach einer Analyse des deutschen Automobilmarktes und der Erarbeitung der mit Elektrofahrzeugen verbundenen technologischen Grundlagen, wird daher zunächst die Relevanz von Automobilen für den Klimawandel und die deutsche Klimapolitik hergeleitet. Im Anschluss wird die Methodik der Ökobilanz erläutert und die für die Ökobilanz verwendete Software eingeführt.

¹ United Nations Information Service (UNIS) 2015

Nach der Definition der Grundlagen wird eine Ökobilanz für die elektrische, die benzin- und die dieselangetriebene Variante eines in seinen grundlegenden Eigenschaften auf dem VW Golf basierenden Fahrzeugmodells erstellt. In dieser werden die Fahrzeugmodelle hinsichtlich ihrer Klimawirkung, ihres Versauerungspotentials und ihres Energieaufwands analysiert. Die Ergebnisse werden anschließend diskutiert und zur Ableitung von möglichen Entwicklungen und Handlungsempfehlungen verwendet.

2. Der Automobilmarkt in Deutschland

Die Nachfrage nach Mobilität nimmt in Deutschland stetig zu. Die von Personenkraftwagen in Deutschland zurückgelegte Wegstrecke hat sich von 1970 bis zum Jahr 2000 fast verdreifacht (von 212,9 Milliarden Kilometern auf 559,5 Milliarden Kilometer). Seitdem steigt sie zwar langsamer, aber dennoch stetig an. Im Jahr 2014 haben die Personenkraftwagen in Deutschland etwa 627,2 Milliarden Kilometer zurückgelegt.²

Parallel dazu hat sich auch die Nachfrage nach Personenkraftwagen und damit die Anzahl an neuzugelassenen Fahrzeugen in Deutschland bis zum Jahr 2000 stark erhöht (vgl. Abbildung 1, es wurde eine polynomische Trendlinie eingefügt). Die Zahl der Neuzulassungen wuchs von etwa 420 Tausend im Jahr 1955 auf etwa 2,1 Millionen im Jahr 1970 und etwa 3,4 Millionen im Jahr 2000. Betrachtet man den gesamten Trend der Neuzulassungen ist erkennbar, dass die Wachstumsrate der jährlichen Neuzulassungen stetig abnimmt. Im Jahr 2005 war die Anzahl der Neuzulassungen erstmals kleiner als fünf Jahre davor. Es lässt sich vermuten, dass auf dem deutschen Automobilmarkt kontinuierlich eine Marktsättigung eingetreten ist. Mit Ausnahme einiger Schwankungen im Zeitraum der Wirtschaftskrise und der von der Bundesregierung 2009 eingeführten Umweltprämie pendelt sich die Zahl der Neuzulassungen in etwa auf einem konstanten Niveau ein.³ Ab dem Jahr 2015 wird diese auf etwa 3,2 Millionen Fahrzeuge pro Jahr geschätzt (Prognosen bis 2018).

Der deutsche Automobilmarkt wird von den deutschen Automobilherstellern dominiert. Im Jahr 2015 gehörten die meisten neuzugelassenen Fahrzeuge zu der Marke VW (etwa 686.000 Fahrzeuge), gefolgt von Mercedes (etwa 287.000 Fahrzeuge), Audi (etwa 269.000 Fahrzeuge), BMW (etwa 249.000 Fahrzeuge) und Opel (etwa 229.000 Fahrzeuge).⁴

Die meisten Fahrzeuge in Deutschland gehören der Kompaktklasse an. Am 1. Januar 2016 waren dies etwa 11,9 Millionen Fahrzeuge.⁵ Von den im Jahr 2015 neuzugelassenen Fahrzeugen gehörten 26,5% der Kompaktklasse an.⁶

Einen deutlich geringeren Anteil am Automobilmarkt machen elektrisch betriebene Fahrzeuge aus. Im Jahr 2015 wurden knapp über 12.000 rein elektrisch betriebene

² Bundesanstalt für Straßenwesen 2015

³ Vgl. Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle Leitungsstab Presse- und Öffentlichkeitsarbeit 2010, Vorwort

⁴ KBA 2016c

⁵ Statista GmbH 2015, S. 13

⁶ Statista GmbH 2015, S. 9

10.4 Zusammenfassung, Ausblick und Handlungsempfehlung

In dieser Arbeit wurde in Anlehnung an die Normen DIN EN ISO 14040 und 14044 eine Ökobilanz für ein Elektrofahrzeug der Kompaktklasse im Vergleich zu entsprechenden Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor erstellt. Dazu wurden die in den Normen definierten Grundlagen und Anforderungen an die Bestandteile Festlegung des Ziels und des Untersuchungsrahmens, Sachbilanz, Wirkungsabschätzung und Auswertung im gegebenen Kontext der Arbeit erfüllt.

Im ersten Teil der Arbeit wurde dazu für jedes Fahrzeug ein Fahrzeugmodell erstellt und dieses mit einem definierten Produktsystem verknüpft. In der Sachbilanz ist anschließend eine Quantifizierung der für jedes Prozessmodul des Produktsystems relevanten Inputs und Outputs erfolgt. Dazu gehörte insbesondere die Erarbeitung der Materialzusammensetzung der Fahrzeugmodelle, die Bewertung der Fahrzeugherstellung, der Nutzung, des Recyclings und der Bereitstellung von Ressourcen und Energieträgern. Als wesentliche Ergebnisse der Sachbilanz haben sich für jedes Fahrzeugmodell die während des Fahrzeuglebenswegs entstehenden Emissionen und Energieaufwendungen ergeben.

In der Wirkungsabschätzung wurden anschließend die Fahrzeugmodelle innerhalb der Wirkungskategorien „Klimaänderung“ und „Versauerung“ und mit dem „Kumulierten Energieaufwand“ bewertet. Die Ergebnisse der Arbeit wurden anschließend in der Auswertung zusammengefasst, in einer Sensitivitätsanalyse analysiert und mit einer anderen Studie verglichen.

Basierend auf den Ergebnissen dieser Arbeit lässt sich sagen, dass die Umweltwirkungen eines Elektrofahrzeugs der Kompaktklasse insgesamt geringer sind, als die Umweltwirkungen von entsprechenden Fahrzeugen mit Benzin- und Dieselmotor. Zwar liegt das Elektrofahrzeug in der Wirkungskategorie „Versauerung“ nur im Mittelfeld der untersuchten Fahrzeuge, allerdings reduzieren insbesondere die um 15% bis 20% geringere Klimawirkung und der um etwa 25% verringerte Kumulierte Energieaufwand des Elektrofahrzeugs seine Umweltwirkungen im Vergleich zu den konventionellen Fahrzeugen.

Die Aussagekraft des Ergebnisses ist allerdings insofern einzuschränken, weil die in dieser Arbeit verwendeten vereinfachenden Modellannahmen und die heterogene Datengrundlage die Genauigkeit der berechneten Werte limitieren. Insbesondere die kaum vorhandenen Herstellerdaten zu Herstellungsprozessen der untersuchten Fahrzeuge bedeuten, dass die berechneten Werte unter Umständen zum Teil erheblich von der realen Produktionssituation abweichen können.

Auf Grund der unsicheren Datenlage zur Lebensdauer von Akkumulatoren sollte für die Umweltbewertung des Elektrofahrzeugs außerdem ein möglicher Akkumulatortausch berücksichtigt werden. Die Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse zeigen aber, dass trotz des erhöhten Einflusses der energieintensiven Produktion bei zwei Akkumulatoren die Klimawirkung und der Energieaufwand des Elektrofahrzeugs geringer sind als für die konventionellen Fahrzeuge. Die Unterschiede sind aber deutlich geringer. Außerdem könnte

hier eine Veränderung des Fahrscenarios die Umweltwirkung des Elektrofahrzeugs im Vergleich wiederum verringern.

Trotz der vorhandenen Einschränkungen kann davon ausgegangen werden, dass die in dieser Arbeit für die untersuchten Fahrzeuge berechneten Werte für eine Bewertung ihrer Umweltwirkungen geeignet sind, da der Einfluss von Ungenauigkeiten in der Modellierung der Produktion durch den insgesamt untergeordneten Anteil der aus der Produktion resultierenden Umweltwirkungen gemindert wird. Es ist anzunehmen, dass die Modellierung der Fahrzeugnutzung mit durchschnittlichen Verbrauchsdaten eine geringe Fehleranfälligkeit aufweist. Daher kann die Bewertung der Nutzung, welche insgesamt den größten Einfluss auf die Ergebnisse dieser Arbeit hat, als ausreichend präzise angesehen werden.

Zudem weisen die Ergebnisse dieser Arbeit im Vergleich mit einer Arbeit des Instituts für Energie- und Umweltforschung Heidelberg GmbH zwar Unterschiede auf. Insbesondere die Größenordnungen der in beiden Arbeiten berechneten Werte weichen aber nicht wesentlich voneinander ab.

Es ist zu erwarten, dass auf Grund von technologischen Entwicklungen in der Zukunft die bestehenden Unsicherheiten der Datengrundlage abnehmen werden. Vor allem die Entwicklung und Etablierung von Recyclingverfahren für Lithium-Ionen-Akkumulatoren wird die ökobilanzielle Bewertung des Recyclings der Akkumulatoren vereinfachen und kann gleichzeitig die mit ihnen verbundenen Umweltwirkungen reduzieren.

Allerdings werden sich vermutlich viele grundlegende für die ökobilanzielle Bewertung von Elektrofahrzeugen relevante Parameter verändern. So werden insbesondere Verbesserungen in der Akkumulatortechnologie dazu führen, dass die Kapazität verfügbarer Akkumulatoren weiter steigt und dadurch auch die mit Elektrofahrzeugen zurücklegbare Wegstrecke zunimmt. Dies bedeutet vor allem eine notwendige Anpassung des untersuchten Fahrscenarios, da mit einer längeren Reichweite auch eine häufigere Nutzung von Elektrofahrzeugen auf Autobahnen und Landstraßen plausibel wird. Eine mögliche Verbesserung der Lebensdauer von Akkumulatoren macht zudem die Analyse einer längeren Lebensfahrleistung notwendig.

Außerdem hat die Entwicklung der Strombereitstellung in Deutschland vor allem auf die Ökobilanz des Elektrofahrzeugs einen großen Einfluss. Eine Erhöhung des Anteils erneuerbarer Energieträger kann hier insbesondere die Umweltwirkungen durch die Nutzungsphase verringern. Umgekehrt kann ein erhöhter Anteil an fossilen oder nuklearen Energieträgern die Ökobilanz von Elektrofahrzeugen wiederum verschlechtern. Generell bedeuten die stetigen Entwicklungen bei der Strombereitstellung in Deutschland, dass die davon abhängigen Werte in Zukunft von den Ergebnissen dieser Arbeit abweichen.

Die erwartete zunehmende Verbreitung von Elektrofahrzeugen bedeutet für Ökobilanzen außerdem, dass in Zukunft die Verfügbarkeit von entsprechenden Daten zunehmen wird. Gleichzeitig können durch eine erhöhte Nachfrage verursachte Veränderungen der Herstellungsverfahren für Elektrofahrzeuge deren Umwelteinfluss auf die Ökobilanz von Elektrofahrzeugen ändern.

Es ist daher auch in Zukunft notwendig, die ökobilanzielle Bewertung von Elektrofahrzeugen fortzusetzen. Insbesondere die detaillierte Untersuchung einzelner Phasen und Lebenswegabschnitte von Elektrofahrzeugen und die Berücksichtigung von technologischen Entwicklungen und Veränderungen können die Einschätzung der mit Elektrofahrzeugen verbundenen Umweltwirkungen in Zukunft weiter verbessern. Auf Grund der in dieser Arbeit aufgezeigten Unsicherheiten der verfügbaren Daten ist außerdem eine stete Verbesserung der verfügbaren Datenbanken und Quellen unabdingbar.