

# CO<sub>2</sub>-Optimierungspotenziale von Elektro-, Brennstoffzellen- und Verbrennungsfahrzeugen

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

■■■■ : ■■■■ ■■■■ ■■■■  
■■■■ ■■■■ ■■■■ ■■■■

Prüfer: Prof. Dr. M. H. Breitner

Hannover, den 01.09.2016

## **Inhaltsverzeichnis**

<b>Inhaltsverzeichnis</b> .....	<b>I</b>
<b>Abbildungsverzeichnis</b> .....	<b>III</b>
<b>Tabellenverzeichnis</b> .....	<b>IV</b>
<b>Abkürzungsverzeichnis</b> .....	<b>V</b>
<b>1 Einleitung</b> .....	<b>1</b>
1.1 Problemstellung und Motivation .....	1
1.2 Aufgabenstellung.....	1
<b>2 Grundlagen</b> .....	<b>3</b>
2.1 Verbrennungsmotor.....	3
2.2 Elektromotor .....	6
2.3 Brennstoffzelle.....	8
2.4 Batteriesysteme.....	11
2.5 Antriebskonzepte.....	15
<b>3 Beschreibung der Szenarien</b> .....	<b>19</b>
3.1 Technische Daten der betrachteten Fahrzeuge .....	19
3.2 Darstellung der Szenarien .....	21
<b>4 Analyse der Datenbasis und Einflussparameter</b> .....	<b>23</b>
4.1 Fahrzeugherstellung.....	24
4.2 Fahrzeugnutzung.....	25
4.2.1 Energiebereitstellung .....	25
4.2.2 Kraftstoffverbrauch.....	33
4.3 Entsorgung .....	38
<b>5 Bilanzierung</b> .....	<b>39</b>
5.1 Szenarien unabhängige Bilanzierung .....	39
5.2 Szenarienabhängige Bilanzierung .....	43
5.3 Zusammenfassung .....	47
<b>6 Diskussion</b> .....	<b>50</b>
<b>7 Limitationen</b> .....	<b>60</b>

<b>8</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick .....</b>	<b>61</b>
<b>9</b>	<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>63</b>
<b>10</b>	<b>Anhang.....</b>	<b>69</b>

# 1 Einleitung

## 1.1 Problemstellung und Motivation

Die Auswirkungen des Klimawandels haben sich im Laufe der letzten Jahre immer stärker abgezeichnet. Auch medial und umweltpolitisch hat das Thema zunehmend an Relevanz gewonnen. Trotzdem ist die Entwicklung der Emission von Treibhausgasen davon nahezu unberührt geblieben. Lagen die weltweiten CO<sub>2</sub>-Emissionen im Jahre 1995 noch bei 23.263 Millionen Tonnen, erhöhte sich dieser Wert bis zum Jahr 2013 um circa 54 % auf 35.849 Tonnen (CDIAC 2016). Maßgeblicher Faktor für diese Entwicklung ist neben der fortschreitenden Industrialisierung und Globalisierung vor allem die individuelle Mobilität. So betrug weltweit der Anteil der auf Straßenverkehr zurückzuführenden CO<sub>2</sub>-Emissionen im Jahr 2013 16,93 % und gehört damit zusammen mit Strom/Wärme (42 %) und der Industrie (20 %) zu den größten Einflussfaktoren (BDL 2015). Wird zusätzlich die weltweite wirtschaftliche Entwicklung sowie weltweite Kraftfahrzeug-Zulassungsstatistiken berücksichtigt, lässt sich die Problematik weiter verdeutlichen. Während 2005 die Anzahl der weltweit zugelassenen PKW und Nutzfahrzeuge noch bei 892,8 Millionen Fahrzeugen lag, betrug die Anzahl 2014 schon 1.236,3 Millionen Fahrzeuge. Diese Entwicklung entspricht einem Zuwachs von knapp 38 % (BDL 2015). Gleichzeitig ist die Weltwirtschaft in den letzten Jahren kontinuierlich gewachsen (IMF 2016). Wachsender Wohlstand ermöglicht die Verbreitung von individueller Mobilität, was wiederum mit steigenden Fahrzeugzulassungszahlen und einer erhöhten Umweltverschmutzung verbunden ist. Diese Entwicklungen und die Einführung immer schärferer Abgasgrenzwerte, haben zu einem Umdenken der Automobilindustrie geführt. Neben der Effizienzverbesserung des bestehenden Portfolios, liegt der Schwerpunkt besonders auf der Erforschung und Entwicklung neuer Antriebstechnologien, die mit einem geringeren CO<sub>2</sub>-Ausstoß und ohne lokale Schadstoffemissionen betrieben werden können. Als besonders vielversprechend haben sich hierbei Elektro- und Brennstoffzellenkonzepte erwiesen.

## 1.2 Aufgabenstellung

Ziel dieser Arbeit ist die Offenlegung von Optimierungspotentialen hinsichtlich der CO<sub>2</sub>-Emissionen von Verbrennungsmotor, Brennstoffzellen und Elektrofahrzeugen. Hybridfahrzeuge, die zum Vortrieb sowohl Verbrennungs- als auch Elektromotoren verwenden, werden trotz der aktuell steigenden Marktanteile dieser Fahrzeugklasse nicht berücksichtigt (KBA 2016). Der dafür durchgeführte umfassende Vergleich der

unterschiedlichen Antriebsvarianten wird den gesamten Lebenszyklus der einzelnen Fahrzeugvarianten abbilden. Im Gegensatz zu einem Großteil der bisher zu diesem Thema veröffentlichten Studien wird die Gegenüberstellung allerdings nicht auf Basis von verallgemeinerten Daten, sondern anhand konkreter und praxisnaher Nutzungsszenarien mit im Vorfeld definierten Fahrzeugen durchgeführt. Diese Vorgehensweise bietet die Möglichkeit Handlungsempfehlungen hinsichtlich einer CO<sub>2</sub>-Reduzierung durch die Auswahl und Nutzungsgewohnheiten der oben genannten Antriebsvarianten abzuleiten.

## 8 Zusammenfassung und Ausblick

In dieser Arbeit wurden die CO<sub>2</sub>-Optimierungspotenziale verschiedener Antriebstechnologien anhand einer szenarienabhängigen CO<sub>2</sub>-Bilanzierung von unterschiedlichen Fahrzeugmodellen der Mercedes Benz B-Klasse ermittelt. Die Bilanzierung umfasst den kompletten Fahrzeuglebenszyklus und berücksichtigt somit neben den CO<sub>2</sub>-Emissionen der Nutzungsphase auch die Emissionen der Fahrzeugherstellung und -entsorgung.

Zu Beginn der Arbeit wurden die unterschiedlichen Antriebskonzepte der betrachteten Fahrzeuge dargestellt. Der Schwerpunkt der Betrachtung lag dabei auf der Beschreibung der einzelnen Antriebsstrangkomponenten und dessen Aufgabe im Fahrbetrieb. Im weiteren Vorgehen fand eine Vorstellung der zugrundegelegten Szenarien statt und die verwendete Datenbasis, sowie die bilanzierungsspezifischen Einflussfaktoren wurden analysiert. Hauptaugenmerk der Analyse lag auf den herstellungs- und verbrauchsspezifischen CO<sub>2</sub>-Emissionen der verwendeten Energieträger und der Abhängigkeit der Fahrzeugverbräuche von den Umgebungseinflüssen. Zusätzlich wurden die unterschiedlichen Leistungsparameter der betrachteten Vergleichsfahrzeuge, ebenso wie die begrenzte Lebensdauer der Traktionsbatterie, mittels Korrekturfaktoren berücksichtigt. Es wurde deutlich, dass für das Elektrofahrzeug besonders der Energieverbrauch der Innenraumtemperierung sowie die geringe Lebensdauer der Traktionsbatterie einen großen Einfluss auf das CO<sub>2</sub>-Emissionsniveau besitzen. Ergänzend ist auch der im Betrieb verwendete Energieträger ein entscheidender Parameter. Neben der lokalen Energieumwandlung im Fahrzeug, muss für eine umfassende Betrachtung auch die Erzeugung des Energieträgers berücksichtigt werden. Insgesamt erweist sich vor allem Strom, bei Zugrundelegung der gesamtdeutschen Energiezusammensetzung, als sehr emissionsintensiv. Den geringsten Emissionsfaktor besitzt hingegen der aus Erdgas reformierte Wasserstoff. Nach Abschluss der vorbereitenden Betrachtung wurden anschließend die Bilanzierung und die Diskussion der erarbeiteten Resultate durchgeführt. Das Ergebnis der Berechnung ermöglichte aussagekräftige Rückschlüsse über das Ausmaß und die Bereiche der CO<sub>2</sub>-Reduktionspotenziale. Beginnend bei der Fahrzeugherstellung und -entsorgung, können über ein angepasstes Nutzungsverhalten und die Reduzierung der Emissionsfaktoren des Energieträgers CO<sub>2</sub>-Einsparungen realisiert werden. Die Potenziale in der Herstellung und Entsorgung sind insbesondere für das Elektrofahrzeug ausgeprägt. Weitere Forschungen in der Akkumulatorentechnik können langfristig die Lebensdauer erhöhen und einen Verzicht auf seltene Erden herbeiführen. Dadurch

würden die Herstellungsemissionen der Traktionsbatterie gesenkt und ein Austausch innerhalb der Fahrzeuglebensdauer vermieden werden. Für die Potenziale in der Nutzungsphase ist hingegen eine detaillierte Unterscheidung notwendig. Zwar ergeben sich grundsätzlich bei einer Betrachtung der jährlichen CO<sub>2</sub>-Emissionen für alle Antriebsvarianten, aufgrund der unterschiedlichen Wirkungsgradcharakteristiken der jeweiligen Antriebsstränge, Optimierungspotenziale, jedoch hängen diese unmittelbar von der zugrunde gelegten Fahrleistung und dem Streckenprofil ab. Während das Dieselfahrzeug bei außerstädtischen Bedingungen den geringsten CO<sub>2</sub>-Ausstoß verursacht, ist das Elektrofahrzeug für bevorzugt innerstädtische Einsatzzwecke mit hoher jährlicher Fahrleistung geeignet. Letzteres entspricht beispielsweise einem Fahrzeug im Carsharing-Betrieb. Bei mittleren, bis geringen Fahrleistungen können anderenfalls die hohen Herstellungsemissionen des Elektrofahrzeugs hingegen nicht über den Fahrbetrieb amortisiert werden. CO<sub>2</sub>-Einsparungen durch die Nutzung des Brennstoffzellenfahrzeugs können im Vergleich zu den anderen Fahrzeugkonzepten nur bei hohen Laufleistungen und einem ausgewogenen Verhältnis zwischen Überland- und Stadtfahrten realisiert werden. Liegt hingegen ein hoher Stadtfahrtenanteil bei einer geringen jährlichen Fahrdistanz vor, ist wiederum das Verbrennungsfahrzeug aufgrund der vergleichsweise geringen Herstellungsemissionen am umweltfreundlichsten. Erweitert man die Betrachtung um die deutschlandweit unterschiedliche Stromzusammensetzung, kann dies zu Abweichungen bei der Bestimmung des CO<sub>2</sub>-effizientesten Fahrzeugtyps führen. Ein geringer Emissionsfaktor macht das Elektrofahrzeug auch für den außerstädtischen Einsatz attraktiv, wohingegen erhöhte Emissionswerte den gegenteiligen Effekt bewirken. Gleiches gilt auch für das Brennstoffzellenfahrzeug, sofern der verwendete Wasserstoff durch Elektrolyse erzeugt wird.

Ergänzend zu den Ergebnissen dieser Arbeit ist eine detaillierte Betrachtung des Herstellungs- und Entsorgungsprozesses sinnvoll. Besonders der Einfluss des Fahrzeugrecyclings wird aufgrund einer eingeschränkten Rohstoffverfügbarkeit in den nächsten Jahren weiterhin an Bedeutung gewinnen. Die Ergebnisse der Nutzungsphase können zudem über umfassende Simulationen oder Praxistest erweitert und ergänzt werden. Aufgrund der stetigen Weiterentwicklung der technischen und umweltspezifischen Rahmenbedingungen, müssen zudem die ermittelten Resultate stetig verifiziert und gegebenenfalls korrigiert werden.