

Auswirkungen des WLTP-Zyklus und Analyse von alternativen, erneuerbaren Antriebskonzepten

MASTERARBEIT

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

vorgelegt von

Name: **Stolze**



Vorname: **Dominique Lucas**



Prüfer: Prof. Dr. Michael H. Breitner

Hannover, den 28. März 2019

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	III
Tabellenverzeichnis	V
Abkürzungsverzeichnis	VI
1 Abstrakt	7
2 Einleitung	8
2.1 Relevanz	8
2.2 Zielsetzung	10
2.3 Struktur und Methodik	10
2.3.1 Struktur	10
2.3.2 Methodik	11
3 Grundlagen	12
3.1 Die Automobilindustrie	12
3.2 Zertifizierung von Kraftfahrzeugen und dazugehörige Methoden	15
3.2.1 Neuer Europäischer Fahrzyklus (NEFZ)	16
3.2.2 Worldwide Harmonized Light-Duty Vehicles Test Procedure (WLTP)	17
3.2.3 Vergleich von <i>WLTP</i> und <i>NEFZ</i>	19
3.3 Gesetzliche Grenzwerte	20
3.4 Volumen und Premiumhersteller	22
3.5 Batterie-elektrisches Fahrzeug	23
3.6 Hybrid (HEV) und Plug-In Hybridfahrzeuge (PHEV)	29
3.7 Brennstoffzellenfahrzeug (FCEV)	32
4 Auswirkungen der Umstellung zum WLTP Zyklus	36
4.1 Auswirkungen auf den Hersteller Volkswagen	40
4.1.1 Modellpolitik Volkswagen	40
4.1.2 Grenzwertsituation Volkswagen	44
4.2 Auswirkungen auf den Hersteller BMW	46
4.2.1 Modellpolitik BMW	46
4.2.2 Grenzwertsituation bei BMW	48
5 Analyse alternativer Antriebskonzepte	50
5.1 SWOT-Analyse: Batterie-elektrisches Fahrzeug (BEV)	50
5.2 SWOT-Analyse: Hybrid- (HEV) und Plug-In Hybridfahrzeug (PHEV)	75
5.3 SWOT-Analyse: Brennstoffzellenfahrzeug (FCEV)	88
5.4 Kostenvergleich	97
6 Limitationen	99
7 Zusammenfassung und Ausblick	100

7.1	Zusammenfassung.....	100
7.2	Ausblick.....	101
	Literaturverzeichnis	CIII
	Anhang	CXVI
	Ehrenwörtliche Erklärung	CXX

2 Einleitung

Dieses Kapitel gibt einen Einblick in die Relevanz des Themas und beschreibt die Ziele der Arbeit. Weiterhin wird eine Übersicht der Struktur und der verwendeten Methodik gegeben.

2.1 Relevanz

Seit jeher zählt die Automobilindustrie zu den wirtschaftlich bedeutendsten Branchen in Deutschland. Im Jahr 2017 lag sie unter den Top 3 der umsatzstärksten Wirtschaftszweige^{1,2}. Werden die seit 2005 im Gros stetig ansteigende Umsätze und Gewinne der Branche (s. Abbildung 1) betrachtet – mit Ausnahme des Jahres 2009³ – scheint alles in bester Ordnung zu sein.

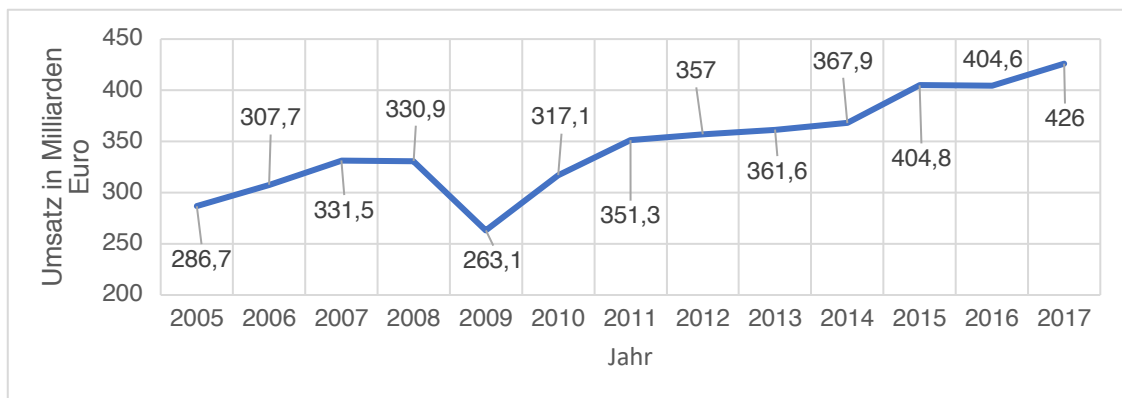


Abbildung 1 - Umsatzentwicklung der deutschen Automobilindustrie
Quelle: Eigene Darstellung nach (Statista 2018)

Jedoch steht die Automobilindustrie immer wieder vor großen Problemen. Eine der größten Herausforderungen ist der Umgang mit der Erreichung von Klimazielen und einer damit verbundenen Eindämmung des Klimawandels.⁴ Um diese Herausforderung bewältigen zu können, ist es notwendig, CO₂-Emissionen und NO_x-Ausstöße zu

¹ Vgl. Ernst & Young GmbH 2017.

² Vgl. Jerzy 2018.

³ Im Jahr 2009 erlitt die deutsche Automobilindustrie ihre stärkste Krise seit 1945. Grund hierfür war unter anderem die Krise auf dem Finanzmarkt sowie steigende Öl- und Kraftstoffpreise. Fehlendes Geld beim Käufer ließ die Nachfrage sinken und folglich die Absatzzahlen in den Keller gehen. Auch die Unsicherheit der Verbraucher durch die Einführung eines neuen Besteuerungssystems nach CO₂-Ausstoß trug dazu bei.

Vgl. hierzu VDA - Verband der Automobilindustrie e.V. 2009; Rüter 2009.

⁴ Vgl. Trechow und Pester 2007.

senken. Dabei ist es bedeutsam, auch die Autofahrer selbst in die Verantwortung zu nehmen und für dieses Thema zu sensibilisieren.

Eine Möglichkeit, die Empfindlichkeit der Autofahrer zu wecken, wurde im Jahr 2009 durch ein neues Besteuerungssystem von Kraftfahrzeugen geschaffen. Seit dem 1. Juli 2009 ist jedes Fahrzeug, das nach diesem Stichtag zugelassen wird, nicht nur wie bisher nach Hubraum und Antriebstyp zu besteuern, sondern ebenfalls nach dem spezifischen CO₂-Ausstoß. Dieser ist verhältnismäßig die größere Komponente in der Kfz-Steuer.⁵

Bei diesem CO₂-Wert handelt es sich, wie auch beim Kraftstoffverbrauch, um zertifizierte Messwerte, die nach bestimmten Vorschriften, die im Folgenden erläutert werden, ermittelt werden müssen.

Bisher kam seit Euro 1⁶, also seit 1992⁷, zur Zertifizierung der „*Neue Europäische Fahrzyklus*“ – kurz *NEFZ* – zum Einsatz. Aufgrund von Kritik an der Durchführung der Messungen im *NEFZ* wird dieser durch den *WLTP* („*Worldwide Harmonized Light-Duty Test Procedure*“) abgelöst. Dabei werden die Emissionen aller ab September 2018 neu zugelassenen PKW nach *WLTP* gemessen und zertifiziert. Eine konkrete Umstellung auf *WLTP*-Zielwerte findet erst im Jahr 2021 statt. Bis dahin werden die *WLTP*-Messwerte in äquivalente *NEFZ*-Werte umgerechnet.⁸

Diese oben beschriebene Umstellung auf den neuen Test-Zyklus bringt verschiedene Probleme mit sich, die sich in unterschiedlichen Maßen auf die Hersteller in der Automobilindustrie wie auch in gewissen Teilen auf die Verbraucher bzw. die Autokäufer und -fahrer auswirken.

Eine weitere Möglichkeit, die Auswirkungen auf den Klimawandel zu beeinflussen liegt in der Nutzung alternativer Antriebskonzepte, die im Gegensatz zu den herkömmlichen Otto- und Dieselmotoren deutlich weniger CO₂-Emissionen versprechen. Gerade heute ist dabei der Elektromotor ein Thema und wird als das „boomende“ Antriebskonzept der Zukunft gehandelt.⁹ Neben den reinen batterie-elektrischen Fahrzeugen (*BEV*) kann hier zwischen hybriden Antriebskonzepten, die eine Mischung aus Otto- bzw. Dieselmotor und Elektroantrieb sind, unterschieden werden. Hierzu zählen klassische Hybrid-Fahrzeuge (*HEV*) sowie Plug-in Hybride (*PHEV*).

Einen anderen, gänzlich neuen Weg, bestreiten Fahrzeuge, die mittels einer Brennstoffzelle die Energie für ihre Elektromotoren selbst im Fahrzeug gewinnen (*FCEV*).

⁵ Vgl. Deutscher Bundestag 2009, v.a. S. 6.

⁶ Vgl. Borgeest 2017, S. 10.

⁷ Vgl. Tzamkiozis, Ntziachristos, und Samaras 2010, S. 909.

⁸ Vgl. Blanck und Kasten 2017, S. 4 ff.

⁹ Vgl. Czazler 2010, S. 50.

Dieses mit Wasserstoff betriebenen Antriebskonzept verspricht eine gänzlich emissionsfreie Fortbewegung.¹⁰

2.2 Zielsetzung

In der vorliegenden Arbeit soll in einem ersten Schritt deutlich gemacht werden, wie die Umstellung vom *NEFZ*- hin zum *WLTP*-Prüfzyklus die Hersteller der Automobilindustrie beeinflusst. Ziel ist es, herauszufinden, welche Anforderungen und Herausforderungen durch die Hersteller beachtet werden müssen. Es wird dabei nur auf den deutschen Markt eingegangen, da die Betrachtung im europäischen oder gar weltweiten Kontext den Rahmen dieser Arbeit überschreiten würde.

Im zweiten Abschnitt der Arbeit werden erneuerbare, alternative Antriebskonzepte mit den heute etablierten Otto- und Dieselmotoren verglichen. Dabei wird mit Hilfe einer SWOT-Analyse jedes Antriebskonzept einzeln betrachtet, sodass später die Zukunftsfähigkeit dieser bewertet und verglichen werden kann.

Um diesen Vergleich genauer zu gestalten, wird weiterhin eine Betriebskosten-Rechnung mit dem Zielwert „Kosten in € pro Kilometer“ durchgeführt.

Daraus lassen sich zwei Forschungsfragen ableiten:

- 1. Wie beeinflusst die Umstellung auf den neuen *WLTP*-Prüfzyklus die OEM-Fahrzeughersteller in der deutschen Automobilbranche?**
- 2. Wie steht es um die Potenziale und die Wirtschaftlichkeit von alternativen, erneuerbaren Antriebskonzepten?**

2.3 Struktur und Methodik

2.3.1 Struktur

Diese Arbeit gliedert sich in sieben Kapitel. Zunächst wurde in der Einleitung die Relevanz des Themas erörtert, sodass im Anschluss daran eine Herleitung von zwei im weiteren Verlauf der Arbeit zu beantwortenden Forschungsfragen stattfinden konnte. Im darauffolgenden Kapitel werden zuerst alle relevanten Grundlagen ausführlich erklärt, sodass zunächst ein Überblick über die Automobilindustrie und danach über die

¹⁰Vgl. Iiyama u. a. 2014, S. 1.

beiden Zertifizierungsverfahren *NEFZ* und *WLTP* entsteht. Auch werden hier die drei im Verlauf der Arbeit analysierten alternativen, erneuerbaren Antriebskonzepte erklärt. Das vierte Kapitel dient zur Analyse der Auswirkungen der Umstellung zum *WLTP*-Zyklus auf Automobilhersteller. Dazu wurde je ein Hersteller aus dem Volumensegment und ein Hersteller aus dem Premiumsegment betrachtet, damit beide Segmente Beachtung erhalten. Das fünfte Kapitel greift mit einer Analyse der zuvor genannten Antriebskonzepte die zweite Forschungsfrage auf und lässt eine genaue Erkenntnis über diese Konzepte entstehen.

Im daran anschließenden Kapitel soll kurz auf die Limitationen bei der Ergebnisfindung eingegangen werden, sodass die Arbeit im siebten Kapitel mit einer Zusammenfassung und einem Ausblick endet. Hier wird ebenfalls eine Antwort auf die Forschungsfragen gegeben.

2.3.2 Methodik

Um im ersten Teil der Arbeit, der Untersuchung der Auswirkungen auf die jeweiligen Hersteller, die durch die Umstellung zum *WLTP*-Zyklus entstanden sind, Ergebnisse zu erhalten, wird eine qualitative Auswertung von öffentlichen Informationen vorgenommen. Dazu werden zum einen die Webseiten der Hersteller betrachtet. Zum anderen wird gezielt in Presse und Medienveröffentlichungen nach publizierten, von den Herstellern bestätigten Informationen gesucht. Eine wissenschaftliche Literaturrecherche bringt dazu keine Ergebnisse (s. Kapitel 6).

Im zweiten Teil der Arbeit wird auf die Methode der SWOT-Analyse zurückgegriffen. Diese Methode dient dazu, die Stärken (Strengths) und Schwächen (Weaknesses) sowie die Chancen (Opportunities) und Risiken (Threats), die durch äußere Faktoren entstehen können, des jeweils untersuchten Antriebskonzeptes aufzuzeigen. Hierzu wird eine ausführliche Untersuchung von Literatur vorgenommen, um möglichst viele Faktoren in den einzelnen Kategorien zu finden und aufzuzeigen.

Der letzte Schritt bedient sich einer Betriebskosten-Rechnung, um die Kosten des jeweiligen Fahrzeugkonzeptes auf einem Kilometer herauszufinden. Dabei wurden frei verfügbare Informationen der Hersteller genutzt.

7 Zusammenfassung und Ausblick

In diesem Kapitel soll zunächst die vorliegende Arbeit zusammengefasst und die Beantwortung der beiden in der Einleitung gestellten Forschungsfragen vorgenommen werden. In einem weiteren Schritt soll ein Ausblick auf weitere Forschungsansätze gegeben werden, die in dieser Arbeit keine Beachtung fanden, jedoch trotzdem von Bedeutung sein können.

7.1 Zusammenfassung

Der Wandel des globalen Klimas ist unter anderem auf den Treibhausgas-Ausstoß des Kraftverkehrs zurückzuführen. Aus diesem Grund wurde mit dem WLTP-Zyklus ein genaueres Verfahren zur Messung der CO₂-Emissionen bei Fahrzeugen politisch beschlossen, um damit zu einer Senkung der Emissionen beizutragen. Auch sollen neue, ökologischere Antriebskonzepte zum Rückgang dieser Belastung beitragen. Im Rahmen dieser Arbeit wurde deshalb untersucht, welche Auswirkung die Umstellung zu dem neuen Messverfahren auf die Automobilhersteller hat und weiterhin eine genaue Analyse von drei alternativen, erneuerbaren Antriebskonzepten vorgenommen.

Dazu wurde zu Beginn ein Überblick über die theoretischen Grundlagen geschaffen, um dem Leser ein Verständnis des Themas zu ermöglichen. Nachdem geklärt wurde, wie sich die Zertifizierungszyklen *NEFZ* und *WLTP* definieren und voneinander abgrenzen, wurden die Antriebskonzepte des Batterie-elektrischen Antriebs, des Hybrid-Antriebs sowie des Brennstoffzellen-Antriebs beleuchtet.

Im folgenden Abschnitt wurde analysiert, wie sich die Umstellung von *NEFZ* hin zu *WLTP* auf die deutschen Automobilhersteller auswirkt. Um hier eine Unterscheidung von Volumen- und Premiumsegment vornehmen zu können, dienen die Hersteller *Volkswagen* und *BMW* als Analysebeispiel. In dieser Untersuchung ist deutlich geworden, dass beide Hersteller Mühen hatten, die Vorgaben fristgerecht zu erreichen. Dennoch ist festzuhalten, dass es *BMW* durch scheinbar bessere Planung einfacher hatte, auf die Umstellung und die damit verbundenen Prozesse zu reagieren und eine Vielzahl der angebotenen Modelle zum Stichtag im September 2018 bereits nach der *WLTP*-Norm zertifiziert hatte. Bei *VW* gingen diese Prozesse deutlich langsamer von statten, sodass Kunden zum Stichtag nicht alle Fahrzeuge bestellen konnten und dadurch teils hohe Wartezeiten entstanden sind. Gleichermäßen wirkte sich die neue Norm auf das generelle Fahrzeugportfolio aus, da hierdurch einige Fahrzeugtypen nicht mehr angeboten werden, um so Kapazitäten und Investitionen in neue Technologien (z.B. OPF) einzusparen.

Auch die Erreichung der politisch vorgeschriebenen Emissions-Grenzwerte stellt die Hersteller vor Herausforderungen. Zur Senkung ihrer Flottenverbräuche und dem CO₂-Ausstoß ist es deshalb unabdinglich, alternative Antriebskonzepte zu entwickeln. Welche Potenziale diese Antriebskonzepte haben und welche Schwächen diese aufweisen, wurde im zweiten Teil der Arbeit aufgezeigt. Es stellte sich heraus, dass jedes Konzept dazu beitragen kann, den Ausstoß von CO₂ zu senken. Vor allem bei den Konzepten BEV und PHEV ist zu beachten, dass dies nur dann gelingen kann, wenn die gesamte Kette von der Herstellung bis zum Betrieb des Fahrzeugs ökologisch aufgebaut ist. Es ist notwendig, dass in der Produktion und zur Ladung der Batterie regenerativ erzeugter Strom genutzt wird. Dieser Fakt ist in gewissem Maße auch bei FCEV zu beachten, da auch diese über Batterien verfügen, ihren Strom allerdings selber produzieren. Bei der Analyse wurden weitere Vorteile aufgedeckt, die diese Antriebstypen aufweisen. Neben reduzierten Lärmemissionen ist auch die Einbindung in Smart Grids oder der hohe Wirkungsgrad des Antriebs zu nennen. Allen Potenzialen stehen gleichermaßen einige Nachteile entgegen, die bei der Einführung dieser noch recht neuen Technologien beachtet werden müssen. Sind BEVs deutlich teurer als vergleichbare Verbrenner-PKW, haben vor allem Interessenten eines FCEV aktuell eine geringe Modellauswahl zu ebenfalls hohen Anschaffungspreisen. Weiterhin ist festzuhalten, dass zur erfolgreichen Einführung dieser Fahrzeuge eine verbesserte Lade- bzw. Tankstellen-Infrastruktur aufgebaut werden muss, um vor allem das Reichweiten-Problem eines BEVs zu lösen, aber auch um die aktuell geringe Anzahl an Wasserstoff-Tankstellen zu erhöhen. Auch muss klar sein, dass die Förderung der Rohstoffe zur Batterieherstellung aktuell unter kritischen Bedingungen stattfindet. Bei der Betrachtung der Betriebskosten der jeweiligen Typen wird ersichtlich, dass unter den aktuellen Umständen ein Elektroauto klare Vorteile gegenüber seiner Konkurrenz aufweist.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass jedes der betrachteten erneuerbaren, alternativen Antriebskonzepte hohe Potenziale hat, es allerdings wichtig ist, den aufgeführten Schwächen und Risiken entgegenzuwirken. Es ist unabdinglich, diese Konzepte weiter zu erforschen und die Schwächen in Stärken umzuwandeln sowie die Chancen zu nutzen, sodass der Klimawandel ein Stück weit eingedämmt wird.

7.2 Ausblick

Ein Ziel dieser Arbeit war es, einen Überblick über die Auswirkungen der Umstellung zum WLTP Zyklus auf die Hersteller zu analysieren. Damit wurde hier nur eine Seite beleuchtet. Denkbar ist es, dass in zukünftigen Arbeiten auch auf die Auswirkungen auf den Kunden eingegangen wird. Aufgrund der angesprochenen Tatsache, dass sich

durch das neue Zertifizierungsverfahren auch die bei der Besteuerung berücksichtigten CO₂-Emissionswerte der Fahrzeuge ändern, kann insbesondere hier ein tieferer Einblick von Bedeutung sein. Denkbar ist beispielsweise eine Berechnung der Veränderung der Kfz-Steuerlast auf den Fahrzeughalter. Betrachtet man dabei das internationale Umfeld, so sind einige Märkte besonders CO₂-sensitiv, was die Berechnung der Kfz-Steuer betrifft. Eine Analyse der Auswirkung im europäischen Fahrzeugmarkt ist ebenfalls eine interessante Möglichkeit für zukünftige Arbeiten. Eine andere Option ist es, zu erforschen, welche Maßnahmen von den Herstellern getroffen werden, damit der Kraftstoffverbrauch und folglich die Schadstoffemissionen gesenkt werden können, um so den nach WLTP gestiegenen Werten entgegenzuwirken.

Weitere Forschungsbereiche, welche erneuerbare, alternative Antriebskonzepte im zweiten Teil der Arbeit betreffen, sind zahlreich vorhanden. Zunächst ist hier die generelle Analyse weiterer Antriebskonzepte denkbar, welche aufgrund des Umfangs dieser Arbeit keine Beachtung gefunden haben. Hier kann mit Erd- und Flüssiggas beispielsweise auf Gas als Antrieb eingegangen werden. Ebenfalls sind Vielstoffmotoren eine interessante Möglichkeit, Fahrzeuge mit alternativen Kraftstoffen zu betreiben. Einen anderen, erwähnenswerten Weg geht das *Power-to-Ammonia* Verfahren, bei dem Ammoniak als Kraftstoff verwendet wird. Es wird deutlich, dass neben den in dieser Arbeit analysierten Konzepten noch viele weitere Möglichkeiten vorhanden sind, in Zukunft auf andere Kraftstoffe zurückzugreifen. Diese Verfahren müssen ebenfalls Beachtung in der Forschung finden und dienen als Grundlage für die Verfassung weiterer wissenschaftlicher Arbeiten.