



Entwicklungspfade für eine klimaneutrale Fahrzeugflotte 2050

Masterarbeit

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

vorgelegt von

Name:



Schulz



Vorname:



Daniel



Prüfer:

Prof. Dr. M. H. Breitner

Ort, den *

Hannover, 27.09.2021

*(Datum der Abgabe)

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	a
Abbildungsverzeichnis	e
Tabellenverzeichnis	g
Abkürzungsverzeichnis	h
Abstrakt	l
1 Einleitung	1
1.1 Ausgangssituation und Motivation	1
1.2 Zielstellung.....	2
1.3 Vorgehensweise zur Zielerreichung	3
2 Grundlagen der Automobilindustrie	4
2.1 Die Automobilindustrie	5
2.2 Die Entwicklung eines Automobils	7
2.3 Automobile Lieferkette	10
2.4 Bedeutung der Automobilindustrie.....	13
2.5 Anforderungen durch den Gesetzgeber	15
2.5.1 Nationale Anforderungen.....	15
2.5.2 Europäische Anforderugen	16
2.6 Fahrzeugflotte der Automobilhersteller	17
2.6.1 Personenkraftwagen.....	17
2.6.2 Nutzfahrzeuge	19
2.6.3 Zukünftige Fahrzeugflotten.....	22
3 Antriebskonzepte in der Fahrzeugtechnik	24
3.1 Exkurs: Verbrennung und Schadstoffemissionen im Fahrzeug	25
3.1.1 Schwefeldioxid SO ₂	26
3.1.2 Stäube und Aerosole	26
3.1.3 Stickoxide NO _x	27
3.1.4 Kohlenmonoxid CO	27

3.1.5	Kohlenstoffdioxid CO ₂	28
3.1.6	Unverbrannte Kohlenwasserstoffe UHC.....	28
3.1.7	Ozon O ₃	28
3.2	Klassische Antriebskonzepte	29
3.2.1	Otto-Motor	36
3.2.2	Dieselmotor	40
3.3	Alternative Antriebskonzepte	44
3.3.1	Bio-Kraftstoffe.....	45
3.3.2	Synthetische Kraftstoffe.....	46
3.3.3	Erdgas und Flüssiggas	48
3.3.4	Wasserstoff.....	51
3.3.5	Hybride Antriebskonzepte	56
3.3.6	Batterieelektrische Fahrzeuge.....	63
4	Übersicht der Antriebsstrangvarianten und persönliche Einschätzung zum zukünftigen Entwicklungs-Potenzial	71
4.1	Persönliche Einschätzung: Klassische Verbrennungsmotoren	75
4.2	Persönliche Einschätzung: Bio- und synthetische Kraftstoffe.....	75
4.3	Persönliche Einschätzung: Erdgas & Flüssiggas	76
4.4	Persönliche Einschätzung: Wasserstoff-Verbrennungsmotor	76
4.5	Persönliche Einschätzung: Brennstoffzellen-Technologie	76
4.6	Persönliche Einschätzung: Hybride-Antriebskonzepte	77
4.7	Persönliche Einschätzung: Batterieelektrische Fahrzeuge.....	77
5	Dekarbonisierung des Verkehrs.....	79
5.1	Flottenbewertung und EU-Normung	79
5.2	Bewertung von Emissionen im Fahrzeug	81
5.2.1	„Tank-to-Wheel“	82
5.2.2	„Well-to-Wheel“	82
5.2.3	„Cradle-to-Grave“	83
6	Umfrage zum Thema Automobil.....	85
6.1	Datenerhebung	85

6.2	Auswertung & Analyse.....	86
6.2.1	Charakterisierung des Samples	86
6.2.2	Auswertung & Analyse: Nutzungsverhalten des privaten PKWs.....	87
6.2.3	Auswertung & Analyse: Meinungen zur Elektrifizierung des Autos	90
6.2.4	Auswertung & Analyse: Verzicht auf die Fortbewegung mit dem Auto	92
6.2.5	Auswertung & Analyse: Einflussnahme der Politik	93
6.3	Empirischen Befunde aus der Umfrage.....	95
7	Experten-Interview.....	98
7.1	Datenerhebung & -aufbereitung	99
7.2	Auswertung.....	101
7.2.1	Perspektive: Wissenschaft	102
7.2.2	Perspektive: Politik	104
7.2.3	Perspektive: Automobilindustrie	114
8	Entwicklungspfade für eine klimaneutralen Fahrzeugflotte 2050	123
8.1	Einführung	123
8.2	Szenario-Technik.....	124
8.2.1	Grundlagen.....	124
8.2.2	Entwicklung von Szenarien	126
8.2.3	Einsatz der Szenario-Technik: Klimaneutrale Fahrzeugflotte 2050.....	126
8.3	Mögliche Entwicklungspfade	129
8.3.1	Einschätzung der Fahrzeugflotte für das Jahr 2030.....	132
8.3.2	Einschätzung der Fahrzeugflotte für das Jahr 2050.....	132
9	Limitationen	135
10	Zusammenfassung & Ausblick	137
10.1	Zusammenfassung	137
10.2	Ausblick zu weiterführenden Forschungen.....	139
	Literaturverzeichnis	i
	Anhang	l
	Umfrageauswertungen	l

Experten Interviews	XVI
Institut der Technischen Verbrennung Leibniz Universität Hannover	XVI
Ministerium für Wirtschaft, Arbeit und Tourismus Baden-Württemberg	XIX
Ford-Werke GmbH	XXIV
IAV GmbH	XXV
Ministerium für Verkehr Baden-Württemberg.....	XXXII
AVL List GmbH.....	XXXVIII
Ministerpräsident Niedersachsen	XLII
Ehrenwörtliche Erklärung	

1 Einleitung

1.1 Ausgangssituation und Motivation

Die gegenwärtige Automobilindustrie befindet sich in den nächsten Jahrzehnten in einer bedeutenden Transformation in Richtung klimaneutrale Mobilität. Der Auslöser für dieses globale Umdenken, ist die rasant wachsende Nachfrage für Mobilität, die Knappheit von fossilen Energieträgern und insbesondere die Verschärfung von internationalen Anforderungen an die ökologischen Auswirkungen im Verkehr. Unter Einbehaltung dieser genannten Aspekte müssen die betroffenen Unternehmen ihre gesamte Unternehmensstrategie danach ausrichten, dass bei steigenden Regulierungen gleichzeitig die Nachfrage für Mobilität gedeckt werden kann. Ebenfalls muss die Entwicklung alternativer Antriebstechnologien für eine ressourceneffiziente und klimaneutrale Mobilität intensiviert werden.

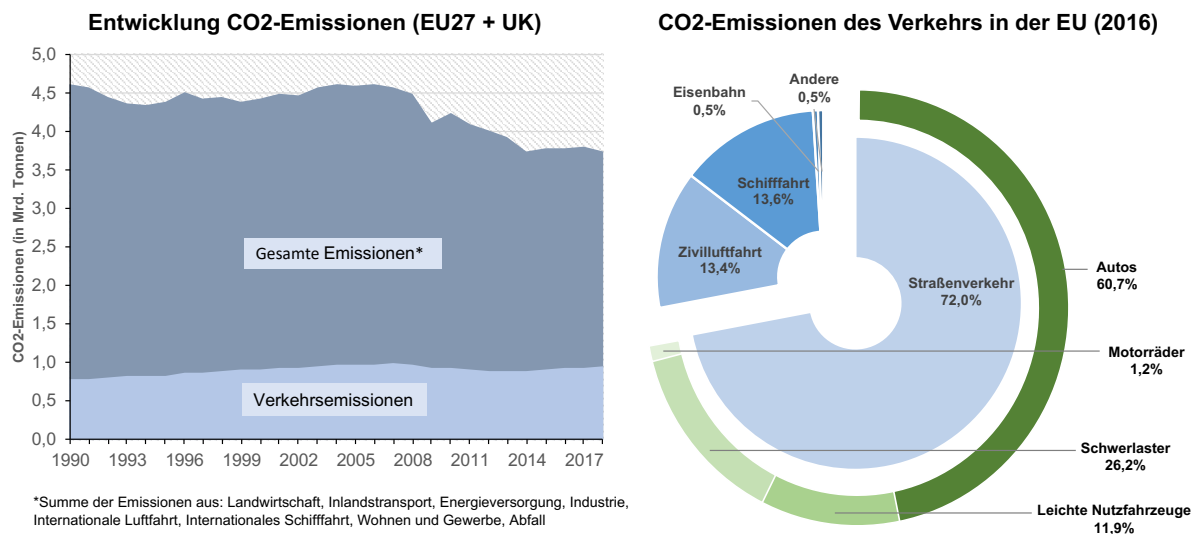


Abbildung 1: Entwicklung der CO₂-Emissionen Europäische Union inklusive Vereinigtes Königreich und CO₂-Emissionen des Verkehrs in der Europäischen Union 2016.

[Quelle: Eigene Auswertung und Darstellung aus (Europäisches Parlament, 2019) und (European Environment Agency, 2021)]

Die Reduzierung der CO₂-Emissionsbelastung durch den Verkehrssektor ist von wegweisender Bedeutung, um die globale Umweltbelastung zu verringern. Um den Hebel durch den Verkehrssektor zu verdeutlichen, zeigt Abbildung 1, im Flächendiagramm, die Entwicklung der CO₂-Emissionen von 1990 bis 2018 in der Europäischen Union und im Vereinigten Königreich (UK). Es ist festzustellen, dass der

Verlauf für die gesamten Emissionen vor 2008 recht linear auf einem hohen Niveau verlaufen ist und ab 2008 ein Abwärtstrend zu beobachten ist. Die Gesamtemissionen setzen sich u.a. aus den Sektoren Landwirtschaft, Energieversorgung oder auch Industrie zusammen. In diesen Sektoren konnten die Emissionen stark reduziert werden. (European Environment Agency, 2021)

Demgegenüber wird die Gesellschaft fortwährend mobiler und gleichzeitig steigen damit die CO₂-Emissionen im Zeitraum von 1990 bis 2018 um ca. 21 %. Damit ist der Verkehrssektor ein entscheidender Problemsektor, um die Klimaschutzziele zukünftig zu erreichen. Um diesen Aufwärtstrend entgegenzuwirken, hat die Europäische Union im EU-Klimaschutzgesetz als Teil des europäischen Grünen Deals beschlossen, die Emissionen des Verkehrssektors bis 2050 um 60 % im Vergleich zum Bezugsjahr 1990 zu senken (Europäisches Parlament, 2019). In Abbildung 1 werden die prozentualen Anteile von den einzelnen Verkehrsträgern im Verkehrssektor in einem Kreisdiagramm separiert dargestellt. Der zentrale Anteil wird durch den Straßenverkehr mit 72 % ausgelöst. Davon werden 60,7 % durch Autos, 11,9 % durch leichte Nutzfahrzeuge, 26,2 % durch Schwerlasten und geringfügig mit 1,2 % durch Motorräder ausgestoßen. Neben dem Straßenverkehr ist auch der Schifffahrt mit 13,6 % und der zivilen Luftfahrt mit 13,4 % ein beachtenswerter CO₂-Ausstoß zuzuschreiben. Der Ausstoß durch die Eisenbahn mit nur 0,5 % ist vergleichsweise zweitrangig.

Damit die ambitionierten EU-Klimaziele erreicht werden können, muss sich insbesondere die Automobilindustrie transformieren, indem sie neue klimaneutrale Antriebstechnologien entwickelt und in die Fahrzeugflotten integriert.

1.2 Zielstellung

Die Thesen dieser Arbeit lautet: „Entwicklungspfade für eine klimaneutrale Fahrzeugflotte 2050“. Der Schlüssel für eine solche klimaneutrale Fahrzeugflotte im Jahr 2050 wird voraussichtlich nicht aus einer einzigen Antriebstechnologie resultieren. Sondern vielmehr von einer Antriebsvielfalt, welche im Laufe der Jahre u.a. durch den technologischen Fortschritt, durch regionale Besonderheiten oder der Infrastruktur variieren werden. Fraglich ist, welche Technologien sich langfristig bewähren und sich damit in die Fahrzeugflotte der Automobilindustrie etablieren können.

Neben der Optimierung von konventionellen Verbrennungsmotoren im Hinblick auf die Reduzierung des Kraftstoffverbrauchs und der Abgasemissionen, wird aktuell in der Elektrifizierung des Automobils das größte Potenzial erwartet. Weitere Technologien,

wie beispielsweise Wasserstoffeinspritzung oder Nutzung der Sonnenenergie werden desgleichen erforscht, um eine Antriebsvielfalt zu gewährleisten und damit z.B. bestimmten regionalen Anforderungen gerecht zu werden. Ferner werden auch alternative Kraftstoffe entwickelt, die zum einen die Abgasemissionen reduzieren sollen und zum anderen den Einsatz in die Bestandsflotte ermöglichen.

Übergeordnetes Ziel dieser Arbeit ist es, anhand der Szenario-Technik mögliche Entwicklungspfade für eine klimaneutrale Fahrzeugflotte mit Hilfe von Einflussfaktoren zu bestimmen. Dabei werden die einzelnen Faktoren teilweise aus der Literatur ausführlich entnommen, aber auch durch Befragung von Experten und aus der Durchführung einer Online-Umfrage ermittelt. Abschließend sollen aus dieser Arbeit mögliche Entwicklungspfade für eine klimaneutrale Fahrzeugflotte 2050 aufgezeigt werden.

1.3 Vorgehensweise zur Zielerreichung

Die Vorgehensweise zur Zielerreichung lässt sich in drei Teile gliedern. Das Ziel, Einsatz der Szenario-Technik zur Erarbeitung von möglichen Entwicklungspfaden, stützt auf drei wissenschaftliche Methoden: Literaturrecherche, Umfrage und Experteninterviews.

Die Basis der Arbeit liegt in der ausführlichen Literaturrecherche. Zu Beginn sollen Grundlagen aus der Automobilindustrie über das notwendige Wissen aufklären. Als Einführung in die Thematik, soll die Bedeutung der Automobilindustrie in Zahlen beschrieben werden. Außerdem wird anhand der Zuliefererpyramide deutlich, wie viele weitere Industrien an der Wertschöpfung beteiligt sind. Zusätzlich werden gesetzliche Anforderungen durch den Gesetzgeber an das Automobil erläutert. Darauf aufbauend wird der Stand der Technik von Antriebstechnologien beschrieben und im Hinblick auf die Klimafreundlichkeit bewertet. Des Weiteren wird auf die Dekarbonisierung des Verkehrs eingegangen und wie zukünftig die Abgasemissionen zu bewerten sind. Mit dem zweiten Teil der Arbeit soll eine Online-Umfrage durchgeführt werden, die ein Meinungsbild bezüglich des Automobils der Zukunft aufzeigen soll. Zur Stärkung der Aussagekraft der Literaturrecherche, dienen Experteninterviews im dritten Teil der Arbeit. Aus Sicht von drei differenzierten Perspektiven, der Wissenschaft, der Politik und der Automobilindustrie, sollen die Meinungen der Experten, in Bezug auf eine klimaneutrale Fahrzeugflotte 2050, berücksichtigt werden. Mit dem Einsatz der Szenario-Technik und der fortgeschrittenen Bearbeitung der Arbeit, sollen dann mögliche Entwicklungspfade zur Erreichung einer klimaneutralen Fahrzeugflotte dargestellt werden.

10 Zusammenfassung & Ausblick

10.1 Zusammenfassung

Die vorliegende Arbeit behandelt die Thesis „Entwicklungspfade für eine klimaneutrale Fahrzeugflotte 2050“. Mit den Forderungen der Klimaneutralität befinden sich viele Industrien, darunter auch die Automobilindustrie, in einer großen und besonders herausfordernden Transformation. Ziel der Arbeit war die Erarbeitung von möglichen Entwicklungspfaden für eine solche Fahrzeugflotte anhand der Szenario-Technik. Die Szenario-Technik stützt dabei auf drei wissenschaftliche Methoden, die im Verlauf der Arbeit ausgearbeitet wurden. Mit den Methoden lässt sich die Arbeit in drei Teile gliedern: Literaturrecherche, Umfrage und Experteninterview.

Mit der einführenden Literaturrecherche sind grundlegende Themen bezüglich der Thematik, einer klimaneutralen Fahrzeugflotte, bearbeitet worden. Wesentliche Grundlagen, wie beispielsweise Größe und Bedeutung der Automobilindustrie, Anforderungen durch die Gesetzgebung und Bewertung der Abgasemissionen dienten als Grundlage für die weitere Bearbeitung. Durch die immer strenger werdenden Grenzwerte für Abgasemissionen, stellt sich die Frage, welches oder welche Antriebskonzepte die Mobilität der Zukunft dominieren werden. Die Literaturrecherche wurde abgeschlossen, indem unterschiedliche Antriebskonzepte, wie batterieelektrische-Fahrzeuge, Hybride-Antriebskonzepte oder auch klassische Verbrennungsmotoren in Verbindung mit alternativen Kraftstoffen zunächst studiert und anschließend analysiert wurden. Aus der Analyse folgte, dass die Elektromobilität, Hybride-Antriebskonzepte, alternative Kraftstoffe und die Wasserstoff-Technologie zentrale Treiber der Erreichung der klimaneutralen Fahrzeugflotte sind.

Im zweiten Teil der Arbeit, wurde eine Online-Umfrage mit 101 Teilnehmern zum Thema Automobil der Zukunft durchgeführt. Wichtige Eckpunkte aus dem Meinungsbild der Befragten dienen der späteren Bildung von möglichen Entwicklungspfaden. Aus dem Meinungsbild ist zu entnehmen, dass die Akzeptanz der Endkunden an alternative Antriebskonzepte entscheidend für die Erreichung der Ziele ist. Der Großteil der Befragten kauften ihr Fahrzeug auf dem Gebrauchtwagen-Markt, sodass klimafreundlichere Technologien seitens der Automobilindustrie nicht direkt in großen Stückzahlen in die Fahrzeugflotte integriert werden. Erst nach Jahren, würden dann diese Fahrzeuge auf dem Gebrauchtwagen-Markt gekauft werden. Ebenfalls ergab die Umfrage, dass eine Kaufprämie einen Einfluss auf die zukünftige Kaufentscheidung habe. Damit könnten die alternativen Antriebe schnell in die Fahrzeugflotte integriert werden.

Die durchgeführten Experteninterviews, im dritten Teil der Arbeit, dienten der Erfragung der Meinungen von Experten. Dabei sind mit den Interviews drei Perspektiven: Wissenschaft, Politik und Automobilindustrie beleuchtet worden. Die Experten haben teilweise unterschiedliche Ansichten im Hinblick auf die klimaneutrale Mobilität der Zukunft. Als Schlüsselfaktoren zur Zielerreichung werden z.B. Elektrifizierung der Antriebe, Weiterentwicklung der klassischen Verbrennungsmotoren im Hinblick auf Wirkungsgradoptimierung und alternativen Kraftstoffe, erhöhte Nutzung des öffentlichen Personenverkehrs und die Wasserstoff-Technologie genannt. Ferner geht aus den Experteninterviews hervor, dass eine zeitgleiche Energiewende, neben der Mobilitätswende stattfinden muss, damit der verwendete Strom für die Elektromobilität oder der Herstellung von alternativen Kraftstoffen aus erneuerbaren Energiequellen besteht. Werden weiterhin fossile Energieträger wie Kohle oder Erdöl verwendet, so wird eine Klimaneutralität nicht erreicht. Aus der Perspektive Wissenschaft und Automobilindustrie wird ein geeigneter Rahmen mit Technologieneutralität von der Politik gefordert. Alternative Antriebskonzepte werden sich mit der Zeit erfolgreich auf dem Markt durchsetzen und klimaschädliche Antriebskonzepte verdrängen. Die interviewten Experten beschreiben die Klimaziele als sehr ambitioniert und betonen, dass eine Transformation stattfinden muss, damit diese Ziele erreicht werden können.

Die vorliegende Arbeit wurde abgeschlossen mit dem Einsatz der Szenario-Technik zur Erarbeitung von möglichen Entwicklungspfaden für eine klimaneutrale Fahrzeugflotte im Jahr 2050. Dabei wurden zwei entgegengesetzte Extremszenarien definiert, welche die möglichen Entwicklungspfade eingrenzen. Voraussichtlich liegt der tatsächliche Entwicklungspfad zwischen diesen beiden aufgespannten Extremszenarien. Als Ergebnis dieser Arbeit werden mögliche Entwicklungspfade und eine persönliche Einschätzung zur Erreichung einer klimaneutralen Fahrzeugflotte im Jahr 2050 präsentiert. Ein möglicher Entwicklungspfad ist z.B.:

- Schnelle Elektrifizierung der Fahrzeugflotte
- Einführung von E-Fuels für die Bestandsflotte
- Weitere klimaneutrale Antriebskonzepte werden entwickelt und eingeführt
- Energiewende wird erfolgreich abgeschlossen
- Akzeptanz der Endkunden bezüglich alternativer Antriebskonzepte

Zu betonen ist, dass es sich bei diesem vorgestellten Pfad um eine theoretische Betrachtung handelt. Das Ziel einer klimaneutralen Fahrzeugflotte, kann auch über andere Pfade erreicht werden.

10.2 Ausblick zu weiterführenden Forschungen

Angesicht der beschriebenen Limitationen in Kapitel 9, sollte eine weiterführende Forschung die aufgezeigten Punkte bearbeiten. Darunter gehört ein erhöhter Stichprobenumfang in der Umfrage, so wie eine gleichmäßig verteilte Altersstruktur und regionaler Hintergrund der Befragten. Außerdem sollten weitere Experten aus den Perspektiven Wissenschaft, Politik und Automobilindustrie zur positiven Beeinflussung der Forschungsmethode durchgeführt werden. Ebenso sollte in einer fortschreitenden Forschung einzelne mögliche Entwicklungspfade für eine klimaneutrale Fahrzeugflotte 2050 explizit erläutert werden.

Mit Bedacht auf einer bereits verschärften Klimapolitik und der Kürzung des Zeithorizonts auf das Jahr 2045, sollte das Thema der Arbeit angepasst werden. Für die weitere Forschung sollte ebenfalls überlegt werden, ob in der Zukunft die Ziele noch einmal angepasst werden und wie sich die Schlüsselfaktoren mit den möglichen Ausprägungen verändern würden.

Abschließend ist natürlich zu betonen, dass das Ziel der Klimaneutralität global zu kommunizieren ist. Mögliche Entwicklungspfade unterscheiden sich damit regionsspezifisch und sollten sich auf global durchgeführte Experteninterviews stützen. Eine Reduzierung der Erwärmung gelingt nur, wenn die Klimaziele global akzeptiert und entsprechende Maßnahmen umgesetzt werden!