

Inhaltsverzeichnis

I	Abbildungsverzeichnis	I
II	Tabellenverzeichnis	II
III	Formelverzeichnis	II
IV	Abkürzungsverzeichnis	III
1	Einführung	1
1.1	Motivation und Relevanz des Themas	1
1.2	Problemstellung und Zielsetzung	4
1.3	Aufbau und Methodik	6
2	Die verschiedenen Antriebskonzepte	8
2.1	Hybridfahrzeuge	8
2.1.1	Mikro-, Mild- und Voll-Hybride	9
2.1.3	Seriell- und Parallel-Hybride	11
2.2	Elektrofahrzeuge	12
2.2.1	Battery Electrical Vehicle (BEV)	13
2.2.2	Fuel-Cell-Electric-Vehicle (FCEV)	13
2.3	Batterietechnologie	15
3	Einflussfaktoren auf die TCO der alternativen Antriebstechnologien	17
3.1	Methodik	17
3.1.1	Ersatzdaten für die Produktionskosten	21
3.1.2	Kostenstruktur eines Fahrzeugs	22
3.2	Szenarien	23
3.3	Prognostizierte Verkaufszahlen	24
3.3.1	BEV	25
3.3.2	PHEV	26
3.3.3	HEV	27
3.3.4	FCEV	28
4	Berechnung der zukünftigen Komponentenkosten	29
4.1	Fahrzeugdaten von Elektrofahrzeugen nach Segmenten	29
4.2	Fahrzeug antriebsunabhängig	30
4.3	Margen für Händler und Hersteller	33
4.4	Batteriepreise	34
4.5	Elektrischer Antriebsstrang	39
4.6	Brennstoffzelle	42
4.7	Anschaffungspreis ICEV	45
4.8	Anschaffungskosten der alternativen Antriebskonzepte	47
4.9	Vergleich der errechneten Fahrzeugkosten mit Marktdaten	53
4.10	Restwertberechnung	55

5 Betriebskosten	59
5.1 Verbrauch.....	59
5.2 Fossile Treibstoffe	63
5.3 Strompreise	64
5.3.1 Vergünstigungen durch DSM	66
5.4 Wasserstoffpreise.....	67
5.5 Kfz-Steuer.....	69
5.6 Versicherungskosten	71
5.7 Wartung und Reparatur.....	72
6 Wirtschaftlichkeitsbetrachtung	74
6.1 Berechnungsgrundlage für die TCO	74
6.2 Gegenüberstellung der TCO	76
6.2.1 Segment A/B.....	76
6.2.2 Segment C/D	78
6.2.3 Segment H/J.....	81
6.3 Auswirkungen einer Kaufprämie für BEV und PHEV auf die TCO	83
6.4 Auswirkungen einer höheren Jahresfahrleistung auf die TCO	84
7 Umweltanalyse	85
7.1 Methodik.....	86
7.2 Fahrzeugherstellung und -entsorgung.....	86
7.3 Energiebereitstellung und Betrieb.....	89
7.4 Erneuerbare Energien und Elektromobilität	90
7.4.1 Herausforderungen des Energiesystems der Zukunft.....	90
7.4.2 Einfluss der zunehmenden Elektromobilität auf die Energienetze	92
7.5 Synergien durch Integration von BEVs in die Netze.....	93
7.5.1 Demand Side Management (DSM).....	94
7.5.2 Potenziale von Elektrofahrzeugen für die Lastverschiebung.....	95
7.6 Synergien bei der Wasserstoffherzeugung mit EE	98
7.6.1 Power-to-Gas (P2G).....	98
7.7 WtW-Analyse	99
8 Limitationen und Handlungsempfehlung	105
9 Fazit und Ausblick	107
Literaturverzeichnis	i
Anhang	xvii

1 Einführung

1.1 Motivation und Relevanz des Themas

Elektromobilität ist kein neues Phänomen – bereits im Jahr 1881 hat der Siegeszug des Automobils mit Elektrofahrzeugen begonnen. Im Jahr 1900 gab es in den USA sogar mehr Elektroautos als solche mit Verbrennungsmotor. Letztlich setzten sich jedoch mit Benzin und Diesel betriebene Fahrzeuge durch. Die Gründe damals waren die gleichen wie heute: Sie hatten eine größere Reichweite und die Entwicklung der Batterien konnte mit dem Siegeszug des Erdöls nicht Schritt halten (BmBF 2013, S. 2-3). Heute ist das Thema Elektromobilität wieder aktuell. Das allgemeine und politische Interesse ist groß, da die Elektromobilität im Energiesystem der Zukunft eine große Rolle spielen könnte. Treiber dieser Entwicklung sind die aktuellen Diskussionen über CO₂-Emissionen und Klimawandel. Der Anstieg der Schadstoffe, insbesondere der CO₂-Emissionen, bedroht das Weltklima. In Ballungsräumen ist die Schadstoffkonzentration am höchsten. Dort werden mehr als 80 Prozent der weltweiten Treibhausgase ausgestoßen (Schmidt et al. 2013, S. 8).

Die Europäische Union hat sich im Jahr 1997 in dem globalen Abkommen des Kyoto-Protokolls dazu verpflichtet, die Treibhausgasemissionen der Jahre 2008 bis 2012 gegenüber dem Basisjahr 1990 um 8 Prozent zu reduzieren. Die jeweiligen Mitgliedsstaaten der Europäischen Union müssen dabei in Abhängigkeit ihrer Leistungsfähigkeit unterschiedliche Beiträge leisten. Deutschland hat sich zu einer Reduzierung um 21 Prozent verpflichtet. Dieses Ziel wurde deutlich übererfüllt (BMUB 2015, S. 8). Zudem hat die Europäische Kommission in einem Strategiepapier festgelegt, welchen Beitrag die Europäische Union leisten sollte, um den weltweiten Temperaturanstieg einzugrenzen. Dieses sieht eine Minderung der CO₂-Emissionen bis zum Jahr 2050 um 80 bis 95 Prozent gegenüber 1990 vor. Dabei soll jeder der verursachenden Sektoren hierzu einen Beitrag leisten. Im Verkehrssektor ist das Ziel eine Emissionsminderung von 20 Prozent bis 2030 gegenüber dem Stand von 2008 zu erreichen (EUKO 2011, S. 3-4). Einen Beitrag dazu soll die Regulierung der CO₂-Emissionen von Pkw liefern. Vor diesem Hintergrund wurde im Jahr 2009 die Verordnung (EG) Nr. 443/2009 des Europäischen Parlaments und des Rates zur Verminderung der CO₂-Emissionen von Pkw verabschiedet, die Anfang des Jahres 2012 in Kraft getreten ist (Ernst et al. 2012). In ihr wird ein durchschnittlicher spezifischer CO₂-Ausstoß von 130 g CO₂/km als Zielvorgabe für die europäische Flotte der Pkw-Neuzulassungen im Jahr 2015 festgelegt. Für das Jahr 2020 ist dieser Wert auf 95 g/km angesetzt. Falls die Automobilhersteller diese Vorgaben nicht umsetzen, drohen Milliardenstrafen. Diese Ziele sind mit einer Verbesserung konventioneller Antriebe alleine nicht zu erreichen, sondern bedürfen einer Elektrifizierung der Fahrzeugantriebe. Neben der ambitionierten Klimapolitik ist auch die Senkung lokaler

Schadstoff- und Lärmemissionen ein weltweiter Treiber der Elektromobilität (Peters et al. 2012, S. 118-119).

Zudem nimmt der Verkehrssektor in Bezug auf die Reduzierung der Rohölimportabhängigkeit eine zentrale Rolle ein. Ein Wechsel des Antriebsstranges vom Verbrennungsmotor zum Elektromotor kann hierfür einen erheblichen Beitrag leisten. Dieser kann aufgrund seines höheren Wirkungsgrades die CO₂-Emissionen senken und insbesondere sowohl Luftschadstoffe wie CO, NO_x, SO_x, nicht verbrannte Kohlenwasserstoffe als auch Lärm- und Partikelemissionen reduzieren (Kaschub et al. 2011, S. 1).

Neben dem europäischen Markt findet in den kommenden Jahren ebenfalls in den Märkten USA, Japan und China eine Verschärfung oder Einführung von CO₂-Emissionsgrenzwerten statt (Ernst et al. 2012, S. 24).

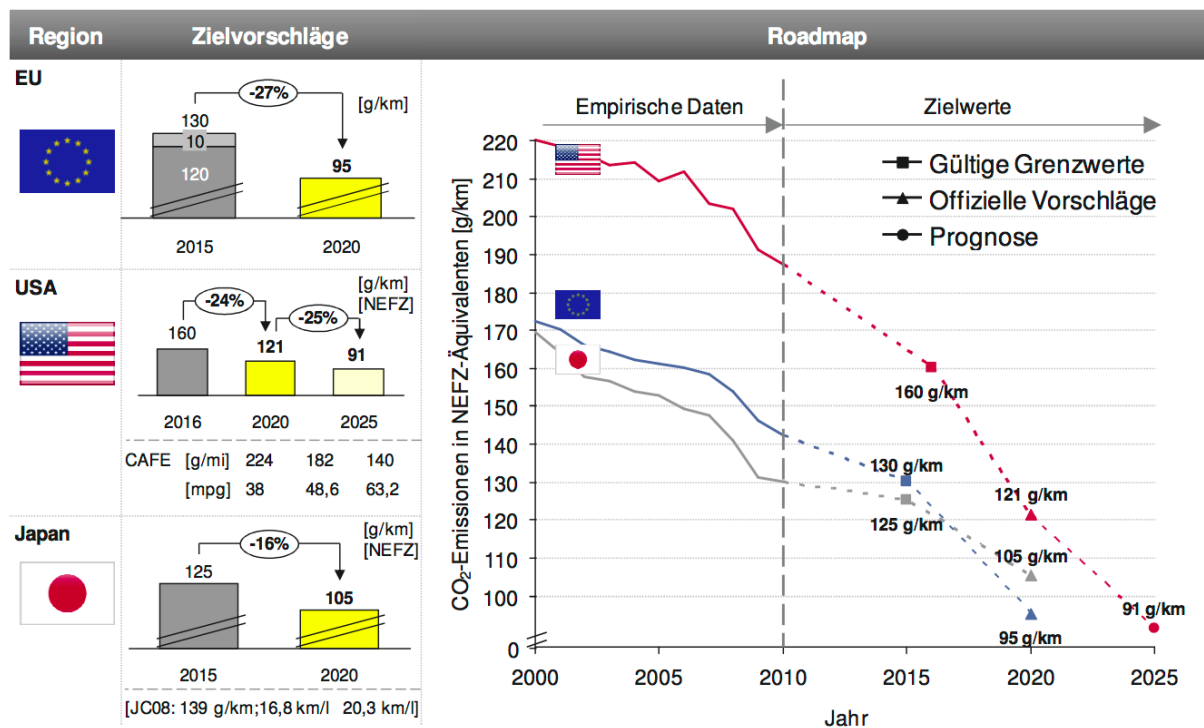


Abbildung 1: CO₂-Emissionsgrenzwerte für Pkw bis 2025
Quelle: (Ernst et al. 2012, S. 25)

Diese Umstände sind Treiber der Elektromobilität. Aus diesem Grund wird elektrifizierten Antrieben für die nächsten Jahrzehnte ein hohes Wachstum zugeschrieben. Dabei unterscheiden sich die verschiedenen elektrischen Antriebskonzepte erheblich in ihrer Wirtschaftlichkeit (Michaelis et al. 2014, S. 51).

Bei der Kaufentscheidung von potentiellen Kunden spielen insbesondere die Kosten neben dem Prestigeeffekt und der Komfortgewohnheit eine erhebliche Rolle. Viele Entscheidungen bei der

Wahl von Antriebssystemen deuten auf die hohe Relevanz der Wirtschaftlichkeit hin (Michaelis et al. 2014, S.67). So legen Halter mit Benzinfahrzeugen in Deutschland durchschnittlich 11.800 km zurück, wohingegen Halter von Dieselfahrzeugen 22.300 km zurücklegen (Follmer et al. 2008). Diese Fahrprofile von Diesel- und Benzin-Pkw korrelieren mit der Wirtschaftlichkeit aus den in Deutschland vorhandenen Rahmenbedingungen. Heute sind Elektrofahrzeuge im Vergleich zu konventionellen Fahrzeugen in der gleichen Klasse deutlich teurer in der Anschaffung, haben dafür aber günstigere Betriebskosten. Der hohe Mehrpreis in der Anschaffung entsteht im Wesentlichen durch die Batterie- bzw. Brennstoffzellenpreise. Da wir uns gegenwärtig in der Anfangszeit der Elektromobilität befinden, ist anzunehmen, dass es noch deutliche Verbesserungen durch Lern- und Skaleneffekte bei den Herstellungskosten und somit auch bei den Endkundenpreisen geben wird.

Für die zukünftige Marktentwicklung von elektrifizierten Fahrzeugantrieben ist es wichtig, wie sich die Kosten im Vergleich zu konventionellen Fahrzeugen entwickeln.

1.2 Problemstellung und Zielsetzung

Diese Arbeit zielt darauf ab die Entwicklung der Wirtschaftlichkeit alternativer Antriebskonzepte in kurz- und langfristiger Sicht zu ermitteln und zu bewerten. Da die Wirtschaftlichkeit eine der größten Hindernisse für eine starke Marktpenetration der Elektromobilität darstellt, wird im Hauptteil dieser Arbeit eine Wirtschaftlichkeitsanalyse durchgeführt. In dieser Analyse werden die Gesamtkosten, hier Total-Cost-of-Ownership (TCO) genannt, verschiedener alternativer Antriebskonzepte mit rein elektrischen sowie Hybrid-elektrischen Antrieben mit denen konventioneller Fahrzeuge verglichen. Das Ziel der Wirtschaftlichkeitsanalyse ist es, einen Überblick über die Entwicklung aller Kosten, die auf einen privaten Fahrzeugkäufer während der Anschaffung bis zum Verkauf des Fahrzeugs anfallen, zu verschaffen. Die zu beantwortenden Forschungsfragen dieser Arbeit sind:

- Wie entwickeln sich die TCO der verschiedenen Antriebskonzepte von heute bis zum Jahr 2045
- Ab welchem Jahr sind Fahrzeuge mit verschiedenen alternativen Antriebskonzepten günstiger in den TCO als Konventionelle
- Wie entwickeln sich die Anschaffungspreise der verschiedenen Antriebskonzepte

Es wird ermittelt, ab welchem Jahr die Kosten der alternativen Antriebskonzepte mit denen konventioneller Antriebe konvergieren, ab wann sie wirtschaftlicher sind und wie sich die Kosten bis zum Jahr 2050 voraussichtlich entwickeln werden. Dafür wird zunächst die Entwicklung der Anschaffungskosten errechnet, die sich bei den alternativen Antriebskonzepten durch Lern- und Skaleneffekte in der Herstellung jedes Jahr reduzieren werden. Anschließend werden alle Betriebskosten in die Analyse mit einbezogen. Dabei hängt die Kostenentwicklung sowohl beim Anschaffungspreis als auch bei den Betriebskosten von vielen Faktoren ab.

Einige Studien belegen immer wieder, dass Elektrofahrzeuge nicht automatisch die Lösung des Klimaproblems sind. Die Klimabilanz hängt stark davon ab, wie der Strom für die Fahrzeuge produziert wird. Wenn der zur Beladung benötigte Strom durch bspw. Braunkohlekraftwerke gewonnen wird, verliert ein Elektroauto sämtliche CO₂-Vorteile in der Umweltbilanz. Des Weiteren kommt hinzu, dass bei der Produktion von Elektroautos durch die verwendeten Materialien deutlich höhere CO₂-Emissionen entstehen. Aus diesem Grund besteht das zweite Ziel dieser Arbeit in der Untersuchung der Treibhausgasbilanz der verschiedenen Antriebskonzepte. Die Forschungsfrage in diesem Teil der Arbeit ist:

- Wie sind die heutigen und die zukünftigen CO₂-Emissionen der verschiedenen Antriebskonzepte über den gesamten Lebenszyklus von der Produktion, der Nutzung bis zu der Entsorgung

Dazu werden zuerst die Wechselwirkungen der zeitweise ans Stromnetz angeschlossenen Fahrzeugbatterien mit dem heutigen und dem zukünftigen Stromerzeugungssystem analysiert. Auf Basis dessen werden die einhergehenden Umwelteffekte untersucht, die mit einer Substitution von Verbrennungsmotoren durch Elektromotoren entstehen. Hierbei wird der Fokus auf die spezifischen CO₂-Emissionen im gesamten Fahrzeublebenszyklus gelegt.

1.3 Aufbau und Methodik

Diese Arbeit gliedert sich in zwei Teile, die zum einen aus einer Wirtschaftlichkeitsanalyse und –prognose verschiedener Fahrzeugantriebskonzepte und zum anderen aus einer Umweltanalyse bestehen. Dabei stellt die Wirtschaftlichkeitsanalyse und -prognose den Fokus dieser Arbeit dar.

Einführend wird im Kapitel 2 der Untersuchungsgegenstand dieser Arbeit erläutert. Zur Darstellung eines Grundverständnisses werden die verschiedenen Antriebskonzepte beschrieben. Die in dieser Arbeit betrachteten Antriebe sind: Hybrid-Electric-Vehicle (HEV), Battery-Electric-Vehicle (BEV), Plug-In-Hybrid-Electric-Vehicle (PHEV), Fuel-Cell-Electric-Vehicle (FCEV) sowie die konventionellen Fahrzeuge, die Internal-Combustion-Engine-Vehicle (ICEV) genannt werden. Als erstes werden die verschiedenen Antriebstechniken vorgestellt. Aufgrund der großen Relevanz der Batterietechnologie auf die zukünftige Entwicklung der Wirtschaftlichkeit batteriebetriebener Elektrofahrzeuge, wird ein Überblick über die heute am häufigsten verwendeten und für die Zukunft meistdiskutierten Batterietypen gegeben.

Daran anknüpfend wird eine Analyse der derzeitigen Herstellungskosten und des mittel- bis langfristigen Potenzials zur Kostenreduktion von Fahrzeugen mit verschiedenen Antriebskonzepten durchgeführt. Nach Wu et al. (2015) ist es dafür sinnvoll, die verschiedenen Antriebskonzepte in ihre Schlüsselkomponenten aufzuteilen und die Kostenentwicklung dieser Komponenten zu analysieren. Die Summe der zukünftigen Komponentenkosten bildet dabei die zukünftigen Herstellungskosten der Fahrzeuge, welche durch den Aufschlag für die OEM-, Zulieferer- und Händlermarge sowie den Logistikkosten schließlich die Anschaffungskosten für Privatkäufer (ohne MwSt.) bilden (Douglas und Stewart 2011, S. 22-29). Dabei stellen die Lernkurven nach Sark et al. (2008) den Ansatz zur Ermittlung des Kostenverlaufs für die Herstellung der Komponenten dar. Zur Berechnung der Lernkurven müssen zunächst die zukünftigen Produktionszahlen der einzelnen Komponenten und die individuelle technologische Lernrate dieser ermittelt werden. Der benötigte Input wie z. B. die Marktprognosen zu den verschiedenen Antriebskonzepten, aus welchen sich die Produktionszahlen der verschiedenen Schlüsselkomponenten ableiten lässt, wird durch eine Literaturrecherche ermittelt. Anschließend werden drei Szenarien gebildet, zu denen die verschiedenen Prognosen aus der Literatur zugeordnet werden. Auf Basis dieser Daten wird eine Szenarioanalyse durchgeführt. Durch eine Szenarioanalyse wird angestrebt, objektiv-quantitative Methoden mit Erfahrungen und Einschätzungen von Experten auf die Zukunft zu verbinden. Es geht dabei um die Ermittlung möglicher und unterschiedlicher Konstellationen, die sich in der Zukunft ergeben können (Mißler-Behr 1993, S. 1-8).

Es werden für jedes Szenario Lernkurven zu den Herstellungskosten der kostenrelevanten Bauteile berechnet. Anschließend werden die Anschaffungskosten verschiedener Antriebskonzepte für jedes Szenario kurz- und langfristig errechnet. Des Weiteren wird analysiert, wie sich die Betriebskosten in dem betrachteten Zeitraum entwickeln werden. Dies geschieht ebenfalls durch Prognosen aus verschiedenen Literaturquellen, welche auch den drei Szenarien zugeordnet werden. Zuletzt werden auf Basis aller errechneten Werte die Total-Cost-of-Ownership (TCO) der einzelnen Antriebskonzepte für verschiedene Nutzerprofile und Fahrzeugklassen ermittelt und durch den Vergleich mit konventionellen Referenzfahrzeugen bewertet. Die TCO stellen die Gesamtkosten dar und setzen sich aus dem Anschaffungspreis, dem Wertverlust und den Betriebskosten der Fahrzeuge zusammen (Wu et al. 2015).

Bei der Umweltanalyse werden die Fahrzeuge einer Well-to-Wheel (WtW) Analyse unterzogen. Bei alternativen Antriebskonzepten genügt die Tank-to-Wheel (TtW) Betrachtungen nicht mehr und die Umwelteffekte der Strom- bzw. Wasserstoffbereitstellung sind zu untersuchen. TtW beschreibt die Energiewandlung von der Bereitstellung der chemischen Energie im Tank bis zur kinetischen Energie am Rad. Bei herkömmlichen Fahrzeugen ist der Unterschied zwischen WtW und TtW mit einer Differenz von unter 10 Prozent bei Dieselmotoren und 15 Prozent bei Benzinmotoren relativ gering (Noreikat 2015, S. 121). Bei Elektrofahrzeugen hingegen ist der Unterschied deutlich größer. Die genaue Methodik wird am Anfang des jeweiligen Teils detaillierter beschrieben.

9 Fazit und Ausblick

Alternative Fahrzeugantriebskonzepte gelten als ein mögliches Instrument zur Verwirklichung allgemeiner Klimaziele in Deutschland, der EU sowie anderen Ländern und sind für die Automobilindustrie ein Mittel zur Erreichung der CO₂-Flottengrenzen. Unsicherheiten bestehen in der Frage, welche Antriebskombinationen zu welchem Zeitpunkt in ökonomischer und ökologischer Hinsicht die besten Voraussetzungen mitbringen, um zur Erreichung von Zielen wie der Reduktion der Treibhausgasemissionen oder der Senkung der Ölabhängigkeit beizutragen.

Vor diesem Hintergrund werden im Rahmen dieser Arbeit zwei Ziele verfolgt. Das Hauptziel ist die Untersuchung der Wirtschaftlichkeit verschiedener elektrischer und Hybrid-elektrischer Antriebskonzepte gegenüber konventionellen Fahrzeugen mit Verbrennungsmotoren. Dazu wird anhand einer Simulation die Entwicklung der Total-Cost-of-Ownership (TCO) bei den verschiedenen Antriebskonzepten von heute bis zum Jahr 2045 analysiert. Das zweite Ziel besteht aus einer Untersuchung der Treibhausemissionen, die im gesamten Lebenszyklus der jeweiligen Fahrzeuge entstehen.

Einleitend werden im Kapitel 2 die verschiedenen Antriebskonzepte vorgestellt. Generell weisen elektrische Antriebe im Fahrzeug deutliche Vorteile auf. Sie verursachen keine lokalen Lärm- und Schadstoffemissionen und haben einen hohen Wirkungsgrad. Bei batteriebetriebenen Elektrofahrzeugen stehen diesen Vorteilen eine beschränkte Reichweite und derzeitig höhere Anschaffungskosten durch die Fahrzeugbatterie gegenüber. Mit Hybridfahrzeugen sollen die Vorteile von konventionellen Fahrzeugen mit denen von Elektrofahrzeugen kombiniert werden. Dafür gibt es mehrere Varianten. So dient der Elektromotor beim Micro-Hybrid ausschließlich zum Anlassen des Verbrennungsmotors. Beim Mild-Hybrid wird zusätzlich der Beschleunigungsvorgang unterstützt. Beim Voll-Hybrid ist es möglich über kurze Strecken rein elektrisch zu fahren. Der am höchsten elektrifizierte Hybrid ist der Plug-in-Hybrid, bei welchem die Batterie durch das Stromnetz aufgeladen werden kann und elektrische Reichweiten von 50 km möglich sind.

Ein weiteres für die Zukunft relevantes Antriebskonzept ist das Brennstoffzellenfahrzeug, welches durch Wasserstoff elektrische Energie in den Brennstoffzellen erzeugt. Die Energie entsteht durch die Reaktion von Wasserstoff mit Sauerstoff. Als Nebenprodukte entstehen reines Wasser und Wärme. Neben der Schadstofffreiheit stellen die kurzen Tankzeiten von Wasserstoff und die hohe Reichweite die größten Vorteile dar.

Für die Wirtschaftlichkeitsanalyse wurde zunächst mit Hilfe von Literaturrecherchen der notwendige Input für die Szenarioanalyse und den Lernkurvenansatz recherchiert. Zu diesen gehören Prognosen zur globalen Fahrzeugproduktion und den Marktanteilen der jeweiligen Antriebskonzepte. Es wurden zahlreiche Prognosen aus unterschiedlichen Quellen ausgewertet und aus diesen Daten drei Szenarien gebildet, die sich in ihren Marktanteilen der jeweiligen Antriebskonzepte und den weiteren Rahmenbedingungen, die sich auf die Wirtschaftlichkeit dieser auswirken, unterscheiden. Zur Berechnung der Lernkurven wurde aus den jeweiligen Marktanteilen der Antriebskonzepte und der Entwicklung der globalen Fahrzeugproduktion das globale Produktionsvolumen der jeweiligen Antriebskonzepte ermittelt. Da den Komponenten der Fahrzeuge in den meisten Literaturquellen unterschiedliche Lernraten zugesprochen werden, war es sinnvoll die Lernkurven nicht für ein gesamtes Fahrzeug zu ermitteln, sondern für ihre jeweiligen Schlüsselkomponenten. So werden antriebsabhängige Bauteile von alternativen Antriebskonzepten wie die Batterie, der elektrische Antriebsstrang und die Brennstoffzelle zu großen Kostensenkungen in der Herstellung führen. Bei antriebsunabhängigen Bauteilen aller Fahrzeuge und den antriebsabhängigen von konventionellen Fahrzeugen wird hingegen in Zukunft dieser Effekt nicht erwartet. Sie sind bereits sehr ausgereift und können zwar geringe Kostenreduzierungen durch technologische Verbesserungen in der Herstellung erfahren, diese werden jedoch durch Maßnahmen zur Verbrauchsreduzierung kompensiert.

Aus diesem Grund wurde die zukünftige Entwicklung der Komponentenpreise durch den Lernkurvenansatz, der vorsieht, dass sich bei einer Verdopplung der kumulierten Produktion eines Bauteils die Kosten durch Lern- und Skaleneffekte um einen bestimmten Prozentsatz, der Lernrate, reduzieren, für die Szenarien berechnet. In den Szenarien variieren dabei viele Faktoren, die sich auf die Komponentenkosten auswirken. Es wurden ebenfalls für jedes Fahrzeugantriebskonzept mehrere Segmente unterschieden. Für die Ermittlung des spezifischen Produktionsvolumens der Komponenten wurden Eigenschaften für jedes Antriebskonzept in den jeweiligen Segmenten angenommen, die sich in der Fahrzeuggröße und den Eigenschaften wie Motorleistung und Batteriekapazität unterscheiden. Es wurde ein fester Marktanteil der Segmente angenommen und daraus der Mittelwert für die Eigenschaften der Fahrzeuge der jeweiligen Antriebskonzepte wie Batteriekapazität und Motorleistung errechnet. Durch die vorangegangenen Berechnungen zu den Produktionsvolumina von Fahrzeugen der jeweiligen Antriebskonzepte und dem Mittelwert der Größe ihrer Komponenten konnte das kumulierte spezifische Produktionsvolumen der Komponenten errechnet werden. Aus diesen Daten wurden die Lernkurven für die Herstellkosten der Komponenten für jedes Szenario berechnet.

Dadurch ließen sich durch die Summierung der einzelnen Komponentenkosten die Herstellungskosten der verschiedenen Fahrzeuge für jedes Jahr ermitteln. Aus den Herstellkosten wurden unter der Berücksichtigung von Margen der OEM, Zulieferer und

Händler, den Logistikkosten und der Mehrwertsteuer die Anschaffungspreise der gesamten Fahrzeuge für Privatkunden simuliert. Diese Simulation erfolgte durch ein für diese Arbeit erstelltes Excel-Tool, welches aus 30 Arbeitsblättern besteht, in welchen die Daten verarbeitet werden. Die daraus resultierende TCO-Berechnung greift auf alle 30 Arbeitsblätter zurück. Zur Validierung der Berechnungsgrundlage wurden die Listenpreise heutiger Fahrzeuge mit den Berechnungen des Excel-Tools verglichen. Dafür wurden die Eigenschaften der heute auf dem Markt befindlichen Fahrzeuge in das Tool eingegeben und daraus der Anschaffungspreis berechnet. Die Abweichungen zwischen den im Tool errechneten Anschaffungspreisen und den tatsächlichen Listenpreisen heutiger Fahrzeuge lag bei höchstens 10 Prozent, in der Regel jedoch darunter.

Anschließend wurden die Wiederverkaufswerte und die Betriebskosten für die Fahrzeuge der unterschiedlichen Segmente für die verschiedenen Szenarien betrachtet. Die Kraftstoff- bzw. Energiepreise unterscheiden sich dabei in den Szenarien.

Auf Basis dieser Werte wurde im Anschluss die TCO-Berechnung durchgeführt. Dabei wurden die Gesamtkosten betrachtet, die für eine Privatperson beim Kauf eines jeweiligen Fahrzeugs und einer Haltedauer i. H. v. vier Jahren bei einer jährlichen Kilometerleistung von 15 / 25 tausend km entstehen. Zunächst erwiesen sich die TCO der meisten alternativen Antriebe für die heutige Zeit deutlich höher als für die konventionellen Antriebe. Dabei kann heute nur das Hybridfahrzeug aus Kostensicht mit den konventionellen Antrieben konkurrieren. In der nächsten Dekade nähern sich die TCO aller Antriebe in jedem Szenario an, mit Ausnahme des FCEV. Dort sind die Unsicherheiten bzgl. der Marktfähigkeit in der Literatur sehr groß und aus diesem Grund sind die Produktionsprognosen im negativen Szenario sehr gering, woraus sich durch den Lernkurven Ansatz auch nur geringe Kostenreduzierungen realisieren lassen. Andererseits hat der FCEV auch das größte Potential einer Kostenreduzierung in den anderen Szenarien und kann sich im positiven Szenario ab spätestens dem Jahr 2035 deutlich von allen Antrieben in den TCO durchsetzen.

Langfristig werden BEV je nach Szenario im Jahr 2030 bis 2040 durch Kostenreduktionspotenziale bei den Schlüsselkomponenten günstigere Anschaffungspreise haben als konventionelle Fahrzeuge. Eine Ausnahme bildet das negative Szenario für Elektrofahrzeuge. In diesem werden BEV erst im Jahr 2050 ähnliche Anschaffungspreise haben wie Konventionelle. Es erwies sich in der Arbeit, dass die TCO in hohem Maße von dem Anschaffungspreis und dem Wiederverkaufswert der Fahrzeuge abhängen. Die Anschaffungspreise der verschiedenen Antriebskonzepte hängen wiederum stark von den Kosten der Schlüsselkomponenten ab, denen noch große technologische Fortschritte bevorstehen. BEV und PHEV haben derzeit einen deutlich höheren Anschaffungspreis als

konventionelle Fahrzeuge. Gegenwärtig beträgt der Aufpreis in der Golfklasse für ein BEV gegenüber einem benzinbetriebenen Fahrzeug über 17.000 Euro. Im Falle einer hohen Lernrate für die Fahrzeugbatterie und einer hohen globalen Nachfrage nach Elektrofahrzeugen kann sich dieser Unterschied bereits im Jahr 2030 zugunsten des BEV und im Jahr 2035 zugunsten des PHEV umkehren.

Des Weiteren ist die Entwicklung der Kraftstoffkosten für Benzin, Diesel, Strom und Wasserstoff sowie von der zukünftigen Besteuerung dieser Energieträger bedeutend für die TCO der betrachteten Fahrzeuge.

Durch steigende Benzin und Dieselpreise und einer hohen Nachfrage nach Elektrofahrzeugen, die mit hohen Kostenreduktionen in den Schlüsselkomponenten einhergeht, kann die Schwelle zur Wirtschaftlichkeit der BEV in den TCO bereits im Jahr 2024 durchbrochen werden. Durch eine politisch gesetzte Kaufprämie kann die Wirtschaftlichkeit von Batteriebetriebenen Elektrofahrzeugen und Plug-In-Hybriden nochmals mehrere Jahre vorher erreicht werden. So können bei einer Kaufprämie i. H. v. 4000 Euro für BEV, die vom Bund beschlossen und künftig in Deutschland gelten wird, gerade solche im Kleinwagensegment bereits ab dem Jahr 2019 günstigere TCO aufweisen als konventionell betriebene Fahrzeuge. Andererseits wird im negativsten Szenario für Elektrofahrzeuge BEV im kleinsten Segment erst ab dem Jahr 2041 konkurrenzfähig zu konventionellen Fahrzeugen. Im mittleren und großen Segment nähern sich BEV im Jahr 2045 den Konventionellen an, haben aber immer noch höhere TCO.

Allgemein werden sich unabhängig von allen genannten Umständen die TCO der alternativen Antriebe aufgrund der Fortschritte in der Technologie und der Herstellung, die zu einem großen Teil aus Lern- und Skaleneffekten entstehen, verbessern. Langfristig gesehen konvergieren die TCO aller Antriebskonzepte. In den meisten Szenarien werden dabei die stärker elektrifizierten Fahrzeugantriebe mit der Zeit deutlich günstiger als die konventionellen Vergleichsfahrzeuge. Dies wird mit steigender Kilometerleistung verstärkt. Die Berechnungen zeigen auch, dass aus rein wirtschaftlicher Sicht der PHEV sich schwer gegen die anderen Antriebskonzepte durchsetzen wird. So ist dieser in der nächsten Zeit gleichzeitig mit dem BEV teurer in den TCO als konventionelle Fahrzeuge. In Abhängigkeit des Szenarios wird der PHEV kurz- oder langfristig aber die konventionellen Antriebe hinter sich lassen. Jedoch wird das beim BEV noch früher als beim PHEV geschehen. Somit gibt es kaum einen Zeitpunkt, in dem der PHEV das günstigste Antriebskonzept ist. Lediglich in einem Fall wird der PHEV für einen Zeitraum von einem Jahr das günstigste Antriebskonzept sein. Dies geschieht nur im ersten Szenario im Jahr 2018, wenn eine Jahresfahrleistung von 25.000 km und eine Kaufprämie i.H.v 3.000 Euro angenommen wird. Auch in diesem Szenario wird der PHEV ein Jahr darauf vom BEV überholt werden.

Aus den Berechnungen ist auch ersichtlich, dass der FCEV bei einer hohen Marktnachfrage sich langfristig zum günstigsten Antriebskonzept entwickeln wird. Mit steigender Fahrzeuggröße entwickeln sich die TCO zunehmend zugunsten des FCEV. So sind FCEV im größten in dieser Arbeit betrachteten Segment und dem positiven Szenario ab dem Jahr 2030 günstiger in den TCO als Konventionelle und ab dem Jahr 2033 das günstigste Antriebskonzept.

Im zweiten Teil dieser Arbeit wurde untersucht, ob die unterschiedlichen Antriebskonzepte bei den Treibhausgasemissionen einen Vorteil zu konventionellen Fahrzeugen aufweisen. Dabei wurde der gesamte Lebenszyklus der Fahrzeuge, von der Herstellung und Nutzung bis zu der Entsorgung betrachtet. Des Weiteren wurde das mögliche Potenzial von Elektrofahrzeugen zur Lastregelung bei einer zunehmend volatilen Stromversorgung aus erneuerbaren Energien (EE) betrachtet. Durch eine gesteuerte Ladung der Elektrofahrzeuge lässt sich grundsätzlich die Integration fluktuierender erneuerbarer Energieerzeuger in das Stromnetz verbessern.

Es wurde festgestellt, dass die Treibhausgasbilanz bei der Nutzung der verschiedenen Antriebskonzepte unter der Beladung der Elektrofahrzeuge mit dem deutschen Strommix sich nicht signifikant unterscheidet.

Eine andere Sichtweise ergibt sich daraus, dass nicht Durchschnittsemissionen aus dem deutschen Strommix zugrunde gelegt, sondern die CO₂-Emissionen aus dem Kraftwerkspark, der zur Deckung des zusätzlichen Strombedarfs für Elektrofahrzeuge tatsächlich genutzt wird, ermittelt werden. Hierbei haben Elektrofahrzeuge insbesondere bei der gesteuerten Ladung die schlechteste CO₂-Bilanz. So ist die Klimawirkung beim gesteuerten Laden sogar höher als bei der ungesteuerten Beladung nach dem letzten Weg. Erst wenn zusätzliche EE in einem für die Abdeckung des Strombedarfs der Elektroautos erforderlichen Umfang zugebaut werden sinken die Treibhausgasemissionen auf einen nahezu CO₂-freien Ladestrommix. In diesem Fall können Elektrofahrzeuge eine deutlich bessere Klimawirkung aufweisen als alle Konventionellen.

Wenn die Fahrzeugherstellung und -entsorgung hinzukommt, haben insbesondere BEV und PHEV schlechtere Treibhausbilanzen, da die Komponenten der Elektrofahrzeuge höhere Treibhausemissionen bei ihrer Herstellung und Entsorgung aufweisen. Dies führt beim Betrachten der heutigen Treibhausemissionen über den gesamten Lebenszyklus zu schlechteren Werten für BEV und FCEV. Im zukünftigen Energiesystem, bei denen für die zusätzlich von Elektrofahrzeugen entstehende Stromnachfrage weitere erneuerbare Energiequellen installiert werden, sodass keine Grenzkraftwerke für die Beladung zugeschaltet werden müssen, weisen Elektrofahrzeuge weniger als die Hälfte der Treibhausemissionen über ihren Lebenszyklus aus als Konventionelle.