

Plug-in-Antriebstechnologie im Spannungsfeld gesellschaftlicher & wirtschaftlicher Einflussfaktoren – Ausblick in Marktpotenziale bis 2030

Bachelorarbeit

zur Erlangung des akademischen Grades

Bachelor of Science

im Studiengang Technische Betriebswirtschaft – Automobilindustrie

an der Fakultät Betriebswirtschaft

der Hochschule Esslingen,

University of Applied Sciences

Verfassende Person

Patrick Schatz

Schreiberstraße 30

70199 Stuttgart

Matrikelnummer 748946

Erste prüfende Person

Herr Prof. Dr. Ralf Wörner, Hochschule Esslingen

Zweite prüfende Person

Herr Manuel Urstöger, Daimler AG

Abgabedatum

16.08.2017

Vorwort

Die vorliegende Bachelorarbeit zum Thema „Plug-in-Antriebstechnologie im Spannungsfeld gesellschaftlicher & wirtschaftlicher Einflussfaktoren – Ausblick in Marktpotentiale bis 2030“ entstand an der Hochschule Esslingen, Fakultät Betriebswirtschaft, in Kooperation mit der Daimler AG. Sie stellt die Abschlussarbeit meines Studiums der Technischen Betriebswirtschaft / Automobilindustrie (B. Sc.) an der Hochschule Esslingen dar.

An dieser Stelle möchte ich mich bei Herrn Prof. Dr. Ralf Wörner herzlich für die dauerhaft, kompetente Betreuung und fachliche Unterstützung bedanken. Zudem danke ich den Mitarbeitern der Daimler AG, insbesondere Herrn Manuel Urstöger, für die Unterstützung und kooperative Betreuung meiner Abschlussarbeit.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	V
Tabellenverzeichnis	VII
Formelverzeichnis	VIII
Abkürzungsverzeichnis	IX
1 Einleitung	1
1.1 Problemstellung.....	1
1.2 Zielsetzung	1
1.3 Aufbau der Arbeit	2
2 Theoretische Grundlagen Fahrzeugantriebe	3
2.1 Verbrennungsmotor	3
2.1.1 Stand der Technik.....	3
2.1.2 Optimierungsmöglichkeiten.....	4
2.2 Hybridfahrzeuge	6
2.2.1 Einteilung nach Hybridisierungsgrad des Antriebsstrangs	6
2.2.2 Einteilung nach dem Energiefluss.....	11
2.3 Range Extender (REEV)	12
2.4 Elektrofahrzeuge	13
2.4.1 Batteriebetriebene Elektrofahrzeuge (BEV).....	13
2.4.2 Brennstoffzellenbetriebene Elektrofahrzeuge.....	14
2.5 Komponenten des elektrischen Antriebsstrangs	15
2.5.1 Batterie als Energiespeicher	15
2.5.2 E-Maschine als Energiewandler	17
2.5.3 Leistungselektronik (Stromrichter)	19
2.5.4 Getriebe.....	20
2.5.5 Ladetechnik.....	21
3 Externe Einflussfaktoren auf konventionelle und alternative Antriebssysteme	23
3.1 Gesetzliche Rahmenbedingungen und Programme	23
3.1.1 Situation in Europa	23
3.1.2 Situation in den USA.....	27
3.1.3 Situation in China	29
3.1.4 Zusammenfassung	30
3.2 Einfluss von Kundenanforderungen	31
3.2.1 Urbanisierung	31
3.2.2 Digitalisierung	33
3.2.3 Individualisierung	36
3.2.4 Zusammenfassung	36
3.3 Ressourcenverfügbarkeit	37
4 Grundlagen Kostenanalyse	42
4.1 Total Cost of Ownership (TCO).....	42
4.2 Anwendung einer TCO-Kalkulation.....	43

5	Untersuchungsrahmen	46
5.1	Fahrprofile.....	46
5.2	Fahrzeugbeschreibung der Vergleichsfahrzeuge	47
5.2.1	Toyota Prius (PHEV)	47
5.2.2	BMW i3 (BEV)	49
5.2.3	Opel Ampera-e.....	51
6	Kostenanalyse der Vergleichsfahrzeuge	53
6.1	Darstellung der Fahrzeugkosten	53
6.2	Darstellung der Anschaffungskosten	56
6.3	Darstellung der Betriebskosten	57
6.4	Berechnung und Ergebnisse der Total Cost of Ownership Analyse	58
6.4.1	Total Cost of Ownership aus Kundensicht	59
6.4.2	Total Cost of Ownership aus Produzentensicht.....	63
6.4.3	Sensitivitätsanalyse	70
7	Schlussbetrachtung und Ausblick	73
	Literatur	77
	Anlagenverzeichnis	87
	Selbstständigkeitserklärung	89

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Der Deutzer "A"-Motor von Nikolaus August Otto (7)	3
Abbildung 2: Klassifizierung anhand des Hybridisierungsgrads - Eigene Darstellung (13, S. 22)	7
Abbildung 3: Systemschaubild – Plug-in-Hybrid Kraftfahrzeug - Eigene Darstellung (3, S. 4).....	10
Abbildung 4: Antriebsstrang-Topologie von Hybriden (13, S. 24).....	11
Abbildung 5: Systemschaubild batteriebetriebenes Elektrofahrzeug - Eigene Darstellung (3, S. 8).....	14
Abbildung 6: Aufbau und Funktionsweise einer Lithium-Ionen-Batterie (14, S. 234).....	16
Abbildung 7: Weltweite Preisentwicklung für Lithium-Ionen-Batterien – Eigene Darstellung (22).....	17
Abbildung 8: Übersicht verschiedener Bauweisen von E-Maschinen	19
Abbildung 9: Die gängigsten Steckerarten in Deutschland: Schuko (o.l.), CCS (o.r.), Typ 2 oder Mennekes (u.r.) und CHAdeMO (u.l.) (27)	21
Abbildung 10: Induktive Ladetechnologie der Daimler AG (27).....	22
Abbildung 11: Abgaskategorien in den USA - Eigene Darstellung (3, S. 19)	28
Abbildung 12: Anteil der Weltbevölkerung in Städten und Prognose bis 2050 - Eigene Darstellung (65).....	32
Abbildung 13: Prognose Weltbevölkerung bis 2050 - Eigene Darstellung (66).....	32
Abbildung 14: Entwicklung Fahrzeuge mit Internetverbindung - Eigene Darstellung (74).....	35
Abbildung 15: Prognostizierte statistische Reichweite von Ressourcen und Reserven – Eigene Darstellung (80)	38
Abbildung 16: Verbrauch von Erdöl der Top-10 Länder im Jahr 2015 – Eigene Darstellung (81).....	39
Abbildung 17: Preisentwicklung ausgewählter OPEC-Rohöle in den Jahren 2007 bis 2017 – Eigene Darstellung (83).....	40
Abbildung 18: Weltweite Erdölreserven nach Region im Jahr 2015 – Eigene Darstellung (84).....	41
Abbildung 19: Aufbau einer Total Cost of Ownership Analyse aus Produzenten- und Kundensicht	43
Abbildung 20: Toyota Plug-in-Hybrid Modell 2017 (91).....	47
Abbildung 21: BMW i3 (96 Ah) (96)	49
Abbildung 22: Opel Ampera-e (99).....	51
Abbildung 23: TCO-Haltedauer (Privatfahrzeug).....	59
Abbildung 24: TCO-Haltedauer (Flottenfahrzeug)	60

Abbildung 25: TCO pro Kilometer (Privatfahrzeug).....	61
Abbildung 26: TCO pro Kilometer (Flottenfahrzeug).....	61
Abbildung 27: TCO - Haltedauer Privatfahrzeug (USA).....	62
Abbildung 28: TCO - Haltedauer Privatfahrzeug (China).....	62
Abbildung 29: Entwicklung der gesamten Herstellungskosten	63
Abbildung 30: Gewinn- und Verlustverteilung für Produzenten	63
Abbildung 31: Kostenverteilung Toyota Prius Plug-in im Jahr 2030.....	64
Abbildung 32: Kostenverteilung BMW i3 im Jahr 2030	65
Abbildung 33: Kostenverteilung Ampera-e im Jahr 2030.....	65
Abbildung 34: Kosten für den (E-) Antriebsstrang	66
Abbildung 35: Kostenverteilung des Antriebsstrangs im Jahr 2030	67
Abbildung 36: Absolute Batteriekosten der Vergleichsfahrzeuge	68
Abbildung 37: Absolute Batteriekosten durch Prognosen des Unternehmens HORVÁTH & PARTNERS (22).....	69
Abbildung 38: Übersicht zwischen errechneten Gesamtkosten und Zielkosten	69
Abbildung 39: Differenz zwischen Gesamtkosten und Zielkosten unter Berücksichtigung einer individuellen Gewinnmarge...70	
Abbildung 40: Sensitivitätsanalyse nach Fahrzeugtyp und Fahrprofil.....	71
Abbildung 41: Vorlage zur Erläuterung der Auswahlmöglichkeiten aus Kundensicht	74

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Ansätze zur Entwicklung der Wirkungsgraderhöhung konventioneller Antriebssysteme – Eigene Darstellung (10)	5
Tabelle 2: Übersicht nach Hybridisierungsgrad des Antriebsstranges - Eigene Darstellung	10
Tabelle 3: Staffelung der Subventionen für E-Fahrzeuge am Beispiel London - Eigene Darstellung (34)	24
Tabelle 4: Zusammenfassung Kaufprämien in Euro	31
Tabelle 5: Fahrprofil privater Pkw	46
Tabelle 6: Fahrprofil Flottenfahrzeug	47
Tabelle 7: Auszug Fahrzeugspezifikation Toyota Prius Plug-in – Eigene Darstellung (91)	48
Tabelle 8: Auszug Fahrzeugspezifikation BMW i3 – Eigene Darstellung (97)	50
Tabelle 9: Auszug Fahrzeugspezifikationen Opel Ampera-e – Eigene Darstellung (102).....	52
Tabelle 10: Kostenübersicht der Komponenten des (E-) Antriebsstrangs im Jahr 2017 (Eigene Annahmen)	54
Tabelle 11: Kostenübersicht der Komponenten des (E-) Antriebsstrangs im Jahr 2020 (Eigene Annahmen)	55
Tabelle 12: Kosten Basisfahrzeug	56
Tabelle 13: Kosten für Umlagen und Zuschläge	56
Tabelle 14: Anschaffungskosten	57
Tabelle 15: Kostensegmente der Betriebskosten für das Jahr 2017	58

Formelverzeichnis

Formel 1: Prognose des Wertverlusts (85).....	44
Formel 2: Berücksichtigung von Zinseffekten auf vorherige oder spätere Aufwendungen (Bezogen auf den errechneten Wertverlust) (85)	44
Formel 3: Gesamtfahrzeugkosten (85)	44
Formel 4: Betriebskosten mit Zinseffekt	45

Abkürzungsverzeichnis

Abb.	Abbildung
Abs.	Absatz
AG	Aktiengesellschaft
BEV	Battery Electric Vehicle
bzw.	Beziehungsweise
ccm	Kubikzentimeter
CO ₂	Kohlenstoffdioxid
EV	Electric Vehicle
g	Gramm
HK	Herstellkosten
Hrsg.	Herausgeberin oder Herausgeber
Km	Kilometer
Mio.	Millionen
Mrd.	Milliarden
Nr.	Nummer
NEFZ	Neuer Europäischer Fahrzyklus
NL	Nettolistenpreis
NY	New York
PDF	Portable Data Format
PHEV	Plug-in Hybrid Electric Vehicle
S.	Seite
TCO	Total Cost of Ownership
u. a.	und andere, unter anderem
vgl.	vergleiche
z.B.	zum Beispiel

1 Einleitung

1.1 Problemstellung

Im Dezember 2015 beschloss der Weltklimarat ein Klimaschutzabkommen, welches alle Länder dazu verpflichtet ein gemeinsames Ziel zu wahren. Dieses Ziel beinhaltet zum einen die Erderwärmung gegenüber dem vorindustriellen Niveau deutlich unter 2° C zu begrenzen und zum anderen einen Temperaturanstieg von über 1,5° C zu verhindern (1, S. 2).

Die deutsche Bundesregierung gehört dabei zur treibenden Kraft dieses Ziel zu erreichen und besitzt eine Vorreiterrolle innerhalb der EU. Mit dem nationalen Ziel, den Treibhausgasausstoß im Vergleich zum Basisjahr 1990 bis ins Jahr 2050 um ca. 80 % bis 95 % zu senken, leistet Deutschland einen erheblichen Beitrag zur Minderung des europäischen Energieverbrauches (2). Speziell im Verkehrssektor sieht die Bundesregierung großes Einsparpotential hinsichtlich der CO₂-Emissionen von Pkw.

Um diese Ziele zu erfüllen und andere zukünftige Mobilitätsbedürfnisse bedienen zu können, bedarf es einem Technologiesprung hinsichtlich der Elektrifizierung des Antriebsstranges. Dahinter verbirgt sich der Gedanke, dass die gesetzten Ziele durch eine reine Energieeffizienzsteigerung der konventionellen Antriebe nicht erreicht werden können (3, S. 1-2). Im Spannungsfeld zwischen gesellschaftlichen und wirtschaftlichen Einflussfaktoren werden deshalb verschiedene alternative Antriebe diskutiert und beurteilt.

Hinzu gesellt sich die Fragestellung eines Mehrwertes gegenüber dem bisherigen Stand der Technik. Dabei werden oft das nahezu emissionslose Fahren und das elektrische Fahrerlebnis als stärkste Argumente für einen Wechsel in die Elektromobilität beschrieben (4, S. 2). Es bleibt jedoch abzuwarten, wie schnell sich technologische, gesellschaftliche und wirtschaftliche Aspekte miteinander vereinen lassen, um zukünftigen Anforderungen in der Automobilindustrie gerecht zu werden.

1.2 Zielsetzung

Ziel dieser Bachelorarbeit ist es, ausgewählte Plug-in- und Elektrofahrzeuge hinsichtlich gesellschaftlicher und wirtschaftlicher Einflussfaktoren zu bewerten und zu vergleichen. Hauptbestandteil ist eine Kostenanalyse (Total Cost of Ownership Analyse) unter Berücksichtigung verschiedener Sensitivitäten. Im Nachgang soll ein Ausblick in Marktszenarien für 2030 geschaffen werden.

Des Weiteren dient diese Arbeit zur Erlangung des akademischen Grades Bachelor of Science im Studiengang Technische Betriebswirtschaft / Automobilindustrie an der Fakultät Betriebswirtschaft der Hochschule Esslingen.

1.3 Aufbau der Arbeit

Die folgende Bachelorthesis ist in sieben logische Abschnitte gegliedert. Nach der Einführung im ersten Kapitel, bekommt der Leser in Kapitel 2 theoretische Grundlagen bezüglich verschiedener Antriebstechnologien und Komponenten des elektrischen Antriebsstrangs übermittelt. Im Anschluss werden in Kapitel 3 Einflussfaktoren auf konventionelle und alternative Antriebssysteme erläutert. Darunter fallen gesetzliche Rahmenbedingungen, Kundenanforderungen und Ressourcenverfügbarkeit. Im vierten und fünften Kapitel werden die Grundlagen der Kostenanalyse und der Untersuchungsrahmen festgelegt. Schließlich erfolgt in Kapitel 6 die Darstellung der Kosten- und Sensitivitätsanalyse. Kapitel 7 dient zur Bewertung der Ergebnisse und soll einen Ausblick in Marktpotentiale bis 2030 geben.

2 Theoretische Grundlagen Fahrzeugantriebe

In diesem Kapitel werden theoretische Grundlagen verschiedener alternativer Fahrzeugtechnologien sowie dem klassischen Verbrennungsmotor erläutert. Zunächst wird ein Überblick über die konventionelle Antriebstechnologie und deren Stand der Technik gegeben, bevor verschiedenste Varianten der Hybridfahrzeuge und letztendlich auch rein batteriebetriebene, sowie brennstoffzellenbetriebene Elektrofahrzeuge näher beleuchtet werden. Des Weiteren werden ausgewählte Komponenten des elektrischen Antriebsstrangs erläutert.

2.1 Verbrennungsmotor

Im Jahre 1862 erfand Nicolas August Otto den ersten Verbrennungsmotor der Geschichte. Dabei stammt der Deutzer A-Motor aus der ersten Serie von „Ottomotoren“, die in der Gasmotorenfabrik Deutz gebaut wurden (Abb. 1). Verfolgt man diese Entwicklung bis heute, muss festgestellt werden, dass die Erfinder wie Otto, Diesel oder Maybach ein Produkt erbaut haben, welches in seinen Grundprinzipien fast unverändert funktioniert (5, S. 73). Einzig an den Dimensionen und der Ausführungsart ist zu erkennen, dass eine kontinuierliche Weiterentwicklung stattgefunden hat (6, S. 1).

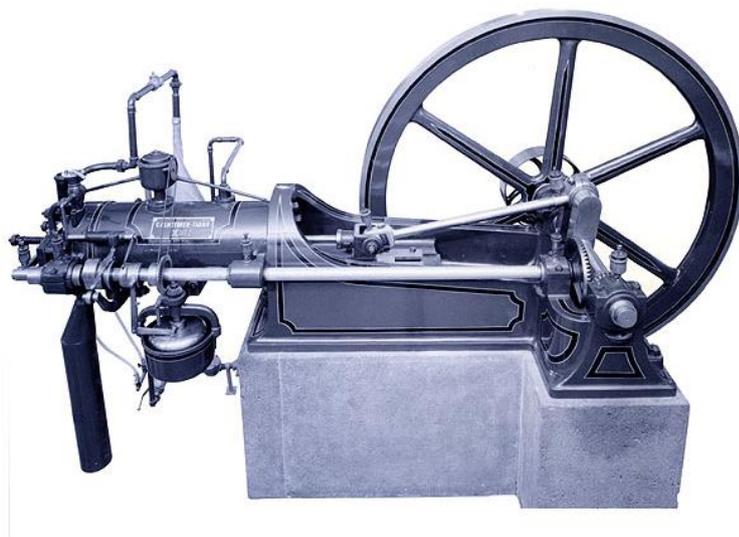


Abbildung 1: Der Deutzer "A"-Motor von Nikolaus August Otto (7)

2.1.1 Stand der Technik

Wie bereits erwähnt blieb das Grundprinzip der Funktion eines Verbrennungsmotors bis heute nahezu unverändert. Dabei wird die im Kraftstoff gebundene chemische Energie in Wärme und mechanische Arbeit an der Kurbelwelle umgesetzt. Ein typisches Merkmal für den Arbeitsprozess ist die „innere Verbrennung“. Diese

beschreibt den Verbrennungsvorgang innerhalb des Kolben, des Zylinders und des Zylinderkopfes (8, S. 254).

Man unterscheidet Verbrennungsmotoren in Hubkolben-, Rotationskolben-, Stirling- oder Dampfmaschinen. Fahrzeuge werden dabei meist mit Benzin- oder Dieselmotoren betrieben (9, S. 57–58).

Wesentlicher Unterschied beider Kraftstoffarten ist die Art der Zündung. Ein Dieselmotor verfügt aufgrund des höheren Verdichtungsverhältnisses über eine Selbstzündungsfunktion. Der Ottomotor hingegen benötigt durch das geringere Verdichtungsverhältnis von Benzin eine Fremdzündung des Kraftstoffgemisches.

Ein weiterer Unterschied zwischen den Kraftstoffarten ist der Wirkungsgrad. Dabei wird zwischen dem Betrieb im Betriebsbestpunkt und dem Betrieb im Stadtverkehr unterschieden. So hat beispielsweise ein Pkw mit Dieselmotor einen Wirkungsgrad von ca. 42 % im Bestpunkt und nur noch etwa 20 % im Betrieb des Stadtverkehrs. Dem gegenüber zeigt ein Ottomotor einen Wirkungsgrad im Bestpunkt von ca. 37 %, im Stadtverkehr sogar nur noch 10 % bis 15 %. Der Unterschied rührt vor allem von der thermodynamisch schlechteren Prozessführung im Ottomotor (10).

2.1.2 Optimierungsmöglichkeiten

Die Kennzahlen im vorangegangenen Kapitel zeigen, dass Pkw-Antriebe mit konventionellem Verbrennungsmotor ein großes Maß an Wirkungsgradoptimierung besitzen. Überwiegend bei täglicher Nutzung, beispielsweise im Stadtverkehr und nicht im Bestpunktbetrieb, ist ein enormes Potential zu erkennen. In Tabelle 1 werden verschiedene Ansätze zur zukünftigen Optimierung des Wirkungsgrads bei Verbrennungsfahrzeugen aufgezeigt.

Tabelle 1: Ansätze zur Entwicklung der Wirkungsgraderhöhung konventioneller Antriebssysteme – Eigene Darstellung (10)

<p>Fertigung/Werkstoffe:</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Leichtbaukonstruktionen ▪ Erhöhte Baufestigkeit für höhere Betriebsdrücke ▪ Downsizing
<p>Tribologie:</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Verringerte Reibleistung und Verschleiß z.B. durch <ol style="list-style-type: none"> 1. Neuartige Beschichtungen 2. Angepasste Konstruktionen
<p>Anpassung Ottomotor an Dieselmotor:</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Direkteinspritzung ▪ Verringerung der Drosselverluste ▪ Verbrennung mit Selbstzündung (Forschungsaggregate)
<p>Anpassung Dieselmotor an Ottomotor:</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Reduzierung der Verdichtung, geringere Schadstoffemissionen ▪ Homogene Verbrennung (Forschungsaggregate)
<p>Downsizing:</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Betrieb der Aggregate in der Teillast bei höheren Mitteldrücken ▪ Leistungsdarstellung durch Aufladung ▪ Gewichtseinsparung durch hohe Leistungsmassen
<p>Getriebemanagement:</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Lange Übersetzungen zur Erhöhung des Mitteldrucks in der Teillast ▪ Doppelkupplungsgetriebe zur Erhöhung des Mitteldrucks in der Teillast bei optimaler Fahrdynamik
<p>Verbesserung der thermodynamischen Prozessführung:</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Brennraumgeometrie ▪ Variabler Ventiltrieb ▪ Gemischaufbereitung ▪ Zylinderdrucksensoren ▪ Regelmodelle zur Prozessführung
<p>Energiemanagement:</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Start/Stopp Betrieb ▪ Schaltbare oder regelbare Nebenaggregate ▪ Gezieltes Aufheizen auf Betriebstemperatur ▪ Geregelter Betrieb im Temperaturbestpunkt

Reduktion der Abgasemissionen durch Abgasnachbehandlung

Um die weltweiten Gesetzesanforderungen hinsichtlich Emissionen erfüllen zu können, müssen Ottomotoren und Dieselmotoren durch Abgasnachbehandlungen optimiert werden. Auf Seiten des Ottomotors kann dies über konstruktive

Maßnahmen wie z.B. Brennraumgestaltung und Parameteroptimierungen der Stellgrößen des Ottomotors (z.B. Luft, Zündung, Einspritzung) erfolgen. Des Weiteren können verbesserte Betriebsstrategien wie z.B. für den Kaltstart, das Katalysatorheizen, das Katalysatorausräumen und die Kraftstoffvorsteuerung zu Reduktionen der Abgasemissionen führen. Auf Seiten der Diesellaggregate können verschiedene Techniken zur Abgasnachbehandlung eingesetzt werden. Zum einen werden durch den Einsatz eines Diesel-Oxidationskatalysator (DOC) Schadstoffe wie Kohlenmonoxid (CO), Kohlenwasserstoff (HC) und Stickoxide (NO) oxidiert und die Partikelfilterregeneration unterstützt. Zusätzlich werden durch den Einsatz von Diesel-Partikelfilter Partikel nahezu vollständig aus dem Abgas entfernt. Zum anderen werden zur Reduktion von Stickoxiden (NOx) zwei alternative Technologien genutzt. In SCR¹ Systemen wird mit Hilfe einer wässrigen Harnstofflösung und entsprechendem Katalysator die Reduktion Stickoxiden erreicht, während Speicherkatalysatoren (NSC) Stickoxide zunächst einlagern und dann über einen Regenerationsprozess abbauen (11).

2.2 Hybridfahrzeuge

Der Begriff „Hybrid“ stammt ursprünglich aus dem Griechischen und bedeutet „gemischt“, „zweierlei Herkunft“ oder auch „zusammengesetzt“. Der „Hybridantrieb“ beschreibt eine Antriebsart eines Fahrzeugs, welches über zwei verschiedene Energiewandler und zwei unterschiedliche Energiespeicher verfügt (12, S. 2). Hybridfahrzeuge werden durch zwei verschiedene Arten in Kategorien eingeteilt. Zum einen über ihren Hybridisierungsgrad und zum anderen durch deren Energiefluss.

2.2.1 Einteilung nach Hybridisierungsgrad des Antriebsstrangs

Bei dieser Form der Kategorisierung werden Hybridfahrzeuge entsprechend ihrem Hybridisierungsgrad eingeteilt. Man unterscheidet dabei zwischen Mikrohybrid, Mildhybrid, Vollhybrid und Plug-in-Hybrid. Abbildung 2 zeigt die Klassifizierung anhand des Hybridisierungsgrads.

¹ Selektive katalytische Reduktion

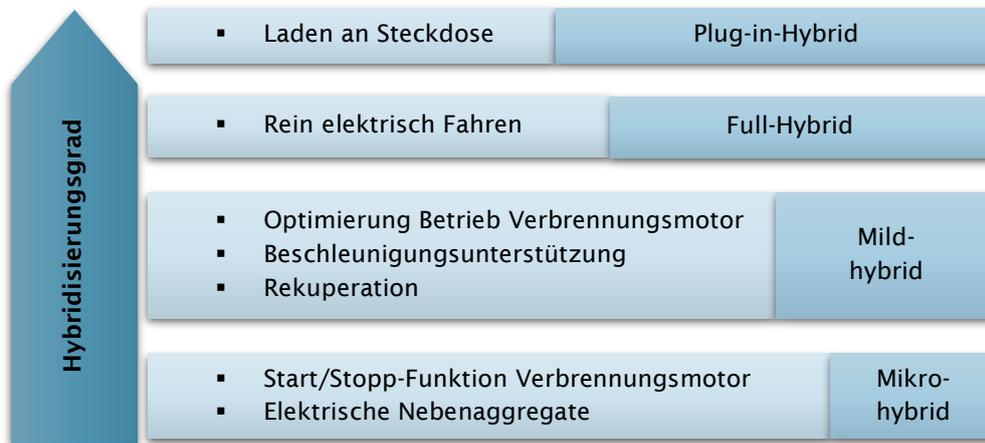


Abbildung 2: Klassifizierung anhand des Hybridisierungsgrads - Eigene Darstellung (13, S. 22)

Mikro-Hybrid

Laut Definition zu Beginn des Kapitels stellt der Mikro-Hybrid keinen Hybridantrieb im klassischen Sinne dar. Angetrieben wird ein Fahrzeug in dieser Variante hauptsächlich durch einen Verbrennungsmotor (12, S. 2). Durch geringfügige Modifikation des Anlassers, durch eine leistungsfähigere Variante oder durch ein Riemenstarter-Generator-System unterscheidet sich der Mikrohybrid nur leicht vom konventionellen Verbrennerfahrzeug. Angenommen das Fahrzeug steht z.B. an einer roten Ampel, wird der Verbrennungsmotor abgeschaltet. Beim Wiederauffahren, bzw. dem Betätigen der Kupplung oder dem Lösen der Bremse (Automatikgetriebe) wird der Verbrennungsmotor automatisch gestartet (14, S. 50).

Ein Unterschied zum reinen Start/Stop-System, ist die Fähigkeit der Aufnahme von Energie durch Rekuperation, der Energierückgewinnung durch den Bremsvorgang. Die Batterieladeregelungstechnik, sowie die Batterie selbst muss dabei so konstruiert sein, dass sie stets in der Lage ist Energie aufzunehmen (14, S. 51). Die Hybridisierung hat in den Mikrohybriden ihren Anfang gefunden und stellt einen wichtigen Schritt in der Entwicklung der Elektrifizierung des Antriebstrangs dar. Somit ist durch diese Technik je nach Fahrprofil (Stadt- oder Überlandverkehr) eine Kraftstoffeinsparung zwischen 3 % und 10 % möglich (12, S. 3).

Entfallene und zusätzliche Komponenten für Mikrohybride:

- Lichtmaschine
- Anlasser
- + Riemenstarter-Generator-System

Mild-Hybrid

Diese Variante der Hybridfahrzeuge verfügt über einen höheren Elektrifizierungsgrad im Vergleich zum Mikrohybrid. Zusätzlich zur Start/Stop-Funktion und Rekuperation, wird der Verbrennungsmotor bei Anfahrt und Beschleunigung unterstützt. Erreicht wird dies durch den Einsatz einer entsprechenden E-Maschine mit einer Leistung von 5 kW bis 20 kW und einer Traktionsbatterie (Hochvoltbatterie) mit einem Spannungsbereich von 48 V bis 150 V.

Des Weiteren kann die Effizienz der Rekuperation gesteigert und eine Senkung des Verbrauchs sowie des Emissionsausstoßes erreicht werden (14, S. 56). Eine Kraftstoffeinsparung gegenüber konventionellen Antrieben beträgt zwischen 15 % und 20 % (15, S. 62).

Zusatzkomponenten Mildhybride:

- + Hochvolt-Batterie
- + E-Maschine
- + Steuergerät

Full-Hybrid

Diese Fahrzeugvariante kann rein elektrisch, nur mit dem Verbrennungsmotor oder in Kombination angetrieben werden. Dabei sind Modifikationen im Vergleich zum Mild-Hybrid notwendig. Gegebenenfalls ist eine zusätzliche Kupplung, mehrere und leistungsstärkere E-Motoren sowie eine Hochvoltbatterie verbaut (14, S. 58). Die Energieflüsse können parallel, seriell oder als Kombination (leistungsverzweigt) angelegt werden. Die verbauten E-Maschinen besitzen eine Antriebsleistung von mehr als 20 kW, je nach Energieflussstrategie sogar bis zu 60 kW. Die Hochvoltbatterie hat eine Spannung von ca. 200 V bis 400 V und das Bordnetz wird konventionell mit 12 V bzw. 14 V betrieben. Eine Reduzierung des Kraftstoffverbrauchs hängt von der Strukturierung der Energieflüsse ab und liegt zwischen 20 % und 30 % im NEFZ (12, S. 4).

Zusatzkomponenten Full-Hybride:

- + Hochvoltbatterie
- + E-Maschine
- + Steuergerät

Beispiele für einen Full-Hybriden sind unter anderem der Toyota Prius, der Audi Q5 Hybrid oder die BMW Active Hybrid Fahrzeugreihe.

Plug-in-Hybrid (PHEV²)

Der Plug-in-Hybrid ist im Prinzip ein Full-Hybrid-Fahrzeug, welches über die Möglichkeit verfügt, mithilfe einer externen Stromquelle, z.B. einer Steckdose oder einem Ladesystem, aufgeladen zu werden (Abb. 3).

Diese Fahrzeugvariante stellt den letzten Schritt beim Übergang in die reine Elektromobilität dar. Das Hauptziel dieser Technik ist es, die elektrische Reichweite eines Fahrzeugs deutlich zu verlängern. Hauptsächlich wird dies durch größere Batterien und höhere Energiekapazität erreicht. Die tatsächliche Reichweite eines Plug-in-Hybrid Fahrzeuges hängt stark vom Fahrprofil und den Umgebungsbedingungen, z.B. der Temperatur ab. Realistische Reichweiten liegen zwischen 30 km und 100 km (12, S. 4).

Besondere Vorteile bietet diese Antriebstechnologie durch das nahezu emissionslose Fahren im Elektrobetrieb und einer enormen Kraftstoffreduzierung. Die Nachteile liegen ähnlich wie bei einem Full-Hybrid in den hohen Kosten, dem hohen Gewicht und der unzureichenden Ladeinfrastruktur. Aufgrund der immer weiter anwachsenden Nachfrage von Elektrofahrzeugen könnte der Plug-in-Hybrid, im Hinblick auf die Reichweite, mittelfristig die optimale Lösung für zukünftige Mobilitätsanforderungen darstellen.

Beispiele für Plug-in-Hybrid Fahrzeuge sind der Audi A3 e-tron, der Toyota Prius Plug-in-Hybrid, der VW Passat GTE und Hyundai Ioniq Plug-in.

² Plug-in-Hybrid Electric Vehicle

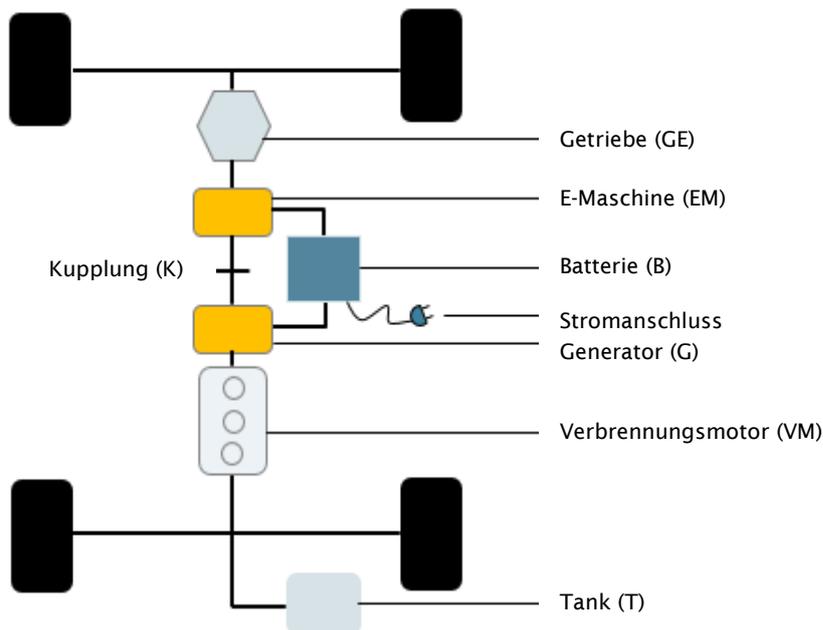


Abbildung 3: Systemschaubild – Plug-in-Hybrid Kraftfahrzeug - Eigene Darstellung (3, S. 4)

Zusammenfassung

Tabelle 2 soll einen erneuten Überblick über die verschiedenen Hybridvarianten geben. Die Fahrzeugkonzepte werden nach Funktionalität, Leistung der E-Maschine, Bordspannung und Verbraucheinsparung unterschieden.

Tabelle 2: Übersicht nach Hybridisierungsgrad des Antriebsstranges - Eigene Darstellung

	Einheit	Mikro	Mild	Full	Plug-in
Funktionalität	-	Start/Stopp, Rekuperation	Start/Stopp, Rekuperation, Boosten	Start/Stopp, Rekuperation, Boosten, rein elektr. Fahren	Start/Stopp, Rekuperation, rein elektr. Fahren, externe Batterieaufladung
Leistung E-Maschine	kW	3 / 12-14	5 - 20	20 - 100	20 - 100
Bordspannung	V	12 / 48	48 - 150	200 - 400	200 - 400
Verbrauchsersparung	%	3 - 10	15 - 20	>20	Je nach Fahrbetrieb

2.2.2 Einteilung nach dem Energiefluss

Eine weitere Unterscheidung der Hybridfahrzeuge erfolgt nach der Klassifizierung des Energieflusses. Abhängig von den Grundstrukturen der Kombinationen von Verbrennungsmotor, E-Maschine, Batterie, Generator und Getriebe wird in drei unterschiedliche Bauvarianten unterschieden: Dem seriellen Hybridantrieb, dem parallelen Hybridantrieb und dem leistungsverzweigten Hybridantrieb.

Serieller Hybridantrieb

Der serielle Hybridantrieb besteht aus einem Verbrennungsmotor (VM) und dem Tank (T), einem Generator (G) und der dazugehörigen Leistungselektronik (LE), einer Batterie (B), dem Differential (D) sowie einer E-Maschine (EM). Dabei besteht keine mechanische Verbindung zwischen Verbrennungsmotor und Antriebsachse. Die Verbindung erfolgt rein elektrisch über zwei Umrichter³ (14, S. 23–24). Die Energiewandler Verbrennungsmotor und E-Maschine sind in „Serie“ geschaltet (Abb. 4). Der Verbrennungsmotor treibt einen Generator an, wobei die bereitgestellte Energie in der Batterie gespeichert wird oder in der E-Maschine zum Antrieb genutzt wird (3, S. 25).

Aufgrund des schlechten Gesamtwirkungsgrads, welcher aus den zusätzlichen Energieumwandlungen resultiert, wird diese Form des Hybridantriebs meist für Bahn- und Schiffsantriebe angewandt. Alternativ dazu wird dieses Konzept in Kombination mit der Plug-in-Hybrid Technologie oft im Pkw-Segment angewandt. Dort wird durch erhöhte Batteriekapazität der Verbrennungsmotor verkleinert und dient somit nur noch als Reichweitenverlängerung, dem sogenannten Range Extender (Vgl. Kap. 2.3) (12, S. 5–6).

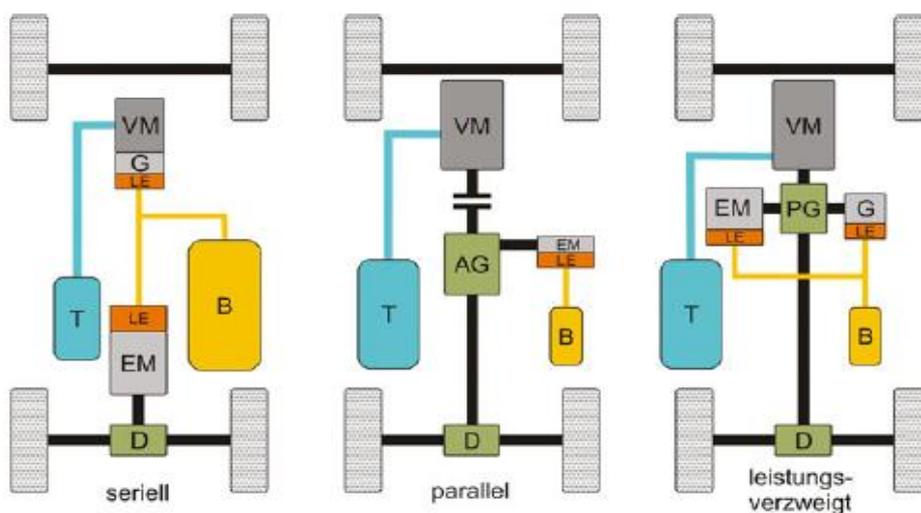


Abbildung 4: Antriebsstrang-Topologie von Hybriden (13, S. 24)

³ (mechanisch/elektrisch und elektrisch/mechanisch)

Paralleler Hybridantrieb

Bei dieser Variante des Hybridantriebs ist, im Vergleich zum seriellen Hybridantrieb, ein direkter mechanischer Durchtrieb vom Verbrennungsmotor (VB) bis zum Rad möglich. Dies bedeutet sowohl der Verbrennungsmotor, als auch die E-Maschine (EM) können über das Automatikgetriebe (AG) und das Differential (D) auf die Antriebsachse zugreifen (13, S. 23). Somit kann das Fahrzeug rein elektrisch, konventionell oder gemischt fortbewegt werden. Des Weiteren können alle abgegebenen Leistungen addiert werden. Um die abgegebene Leistung von Elektro- und Verbrennungsmotor zu überlagern wird in der Regel auf drei verschiedene Getriebe gesetzt. Dabei stehen zur Auswahl ein Planetengetriebe zur Drehzahladdition, eine direkte Kopplung mit Stirnradgetriebe oder Kette zur Momentenaddition oder ein Doppelkupplungsgetriebe zur Zugkraftaddition (14, S. 28).

Leistungsverzweigter Hybridantrieb

Ein leistungsverzweigter Hybrid (engl. Power Split Hybrid) ist eine Kombination aus dem seriellen und dem parallelen Hybridantrieb. Die übertragende, mechanische Energie des Verbrennungsmotors (VB) wird auf zwei verschiedene Pfade aufgeteilt. Zum einen wird diese Energie zur Antriebsachse durchgeleitet und zum anderen im Generator (G) in elektrische Energie umgewandelt (13, S. 25). Ein Planetengetriebe ist für die Verteilung zwischen elektrischer und mechanischer Energie verantwortlich (16, S. 3). Dadurch ist beim mechanischen Antriebspfad der Verbrennungsmotor immer mit der Erzeugung von elektrischer Leistung im Generator verbunden. Diese elektrische Leistung wird in der E-Maschine in mechanische Antriebsenergie umgewandelt. Anders beim rein elektrischen Fahren, hier ist nur die E-Maschine aktiv und wird aus der Batterie versorgt bzw. lädt diese auf (12, S. 7–8).

2.3 Range Extender (REEV)

Der sogenannte Range Extender (auch Range Extended Electric Vehicle REEV oder Extended Range Electric Vehicle E-REV genannt) ist im Grunde genommen ein Elektrofahrzeug mit dem Antriebssystem über E-Maschine und Batterie. Er gehört zur Familie der hybriden Fahrzeugtechnologien. Im Vergleich zum reinen Elektrofahrzeug ist jedoch eine Ladeeinheit zur Erhöhung der Reichweite verbaut. Meist ist der Range Extender, der Reichweitenvergrößerer, ein konventioneller Verbrennungsmotor in Kombination mit einem Generator (14, S. 60). Die Ladeeinheit wird in der Standardvariante seriell ausgeführt. So zählt der Range Extender grundsätzlich zu den seriellen Hybridantrieben. Die Dimensionierung des Verbrennungsmotors hängt sehr stark vom Einsatzgebiet des Fahrzeugs ab.

Dabei sollte der Großteil der Strecken innerhalb der elektrischen Reichweite abgedeckt sein, damit der Verbrennungsmotor nur in Ausnahmen eingesetzt werden

muss, um somit den Effizienzvorteil des elektrischen Antriebsstrangs zu gewährleisten (4, S. 43).

Die Entwicklung zum Range Extender Fahrzeug erfolgt von zwei unterschiedlichen Ausgangspunkten. Auf Seiten eines seriellen Hybridantriebs, muss lediglich die Batteriekapazität vergrößert und gleichzeitig der Verbrennungsmotor verkleinert werden. Umgekehrt führt die Ergänzung einer Range Extender Einheit in einem reinen Elektrofahrzeug sowie der Reduzierung der Batteriekapazität zu einem ähnlichen Resultat (12, S. 10). Durch die Möglichkeit der externen Nachlademöglichkeit stellt der Range Extender eine spezielle Art der Plug-in-Hybride mit hohem Elektrifizierungsgrad dar. Neben dem Verbrennungsmotor als üblichen Energiespeicher-/Wandler könnten beispielsweise auch Zweitaktmotoren, Turbinen oder Brennstoffzellen als Range Extender Einheit verbaut werden.

Beispiele für Fahrzeuge mit Range Extender sind der BMW i3 und der Chevrolet Volt bzw. der Opel Ampera.

2.4 Elektrofahrzeuge

Schon mit dem Beginn der Automobilentwicklung entstanden batterieelektrische Fahrzeuge. Bereits 1882 stellte Werner Siemens seinen elektrischen Kutschenwagen in Berlin vor. Im Jahre 1900 wurde dann das erste fahrtaugliche Elektroauto der Welt präsentiert. Das geschah auf der Weltausstellung in Paris. Der damals erst 25-jährige Ferdinand Porsche war der Entwickler dieses Fahrzeugs. Das Auto hatte zwei Radnabenmotoren an den Vorderrädern montiert, einen 400 kg schweren Bleiakku mit einer Reichweite von damals schon beachtlichen 50 km und konnte mit 50 km/h fortbewegt werden (17, S. 17).

Diese Fahrzeuge konnten sich jedoch in der Vergangenheit nicht durchsetzen. Hauptsächlich lag dies an der Verfügbarkeit der eher schlechten Batterietechnologie. Erst mit der Erfindung der Li-Ionen Batterie änderte sich dies in kürzester Zeit.

Heute steht der Begriff Elektrofahrzeug für eine Vielzahl von Konzepten, die durch die Gemeinsamkeit „Vortriebskraft durch Elektromotoren“ verbunden sind. Der Begriff Elektrofahrzeug umfasst sowohl die batteriebetriebenen Elektrofahrzeuge, als auch die brennstoffzellenbetriebenen Elektrofahrzeuge.

2.4.1 Batteriebetriebene Elektrofahrzeuge (BEV⁴)

Durch den zuvor erwähnten Fortschritt in der Batterietechnologie, dem Vorteil von einer emissionsfreien Fahrt und steigenden Kraftstoffpreisen, wird das Batteriebetriebene Elektrofahrzeug als optimale Lösung der Zukunft gehandelt.

⁴ Battery Electric Vehicle

Das Batteriefahrzeug weist einen simplen Aufbau des Antriebsstranges vor. So werden lediglich die Komponenten Batterie, E-Maschine und Leistungselektronik benötigt (Abb. 5) (15, S. 73). Strom wird dabei über einen Wechselrichter in Gleichstrom umgewandelt und in die Batterie geladen. Nebenverbräuche wie Heizung, Klimaanlage oder Lenk- und Bremsunterstützung müssen ebenfalls von derselben Batterie unterstützt werden (4, S. 43).

Die Wirkungsgrade liegen zwischen 93 % und 98 %. Anzumerken ist dabei, dass die E-Maschine sowohl motorisch als auch generatorisch betrieben werden kann. Somit kann diese das Fahrzeug antreiben aber gleichzeitig auch Strom erzeugen, sobald das Fahrzeug die E-Maschine antreibt. Diese Rekuperation geschieht beispielsweise durch den Bremsvorgang oder eine Bergabfahrt (3, S. 7). Beispiele für batteriebetriebene Elektrofahrzeuge sind der BMW i3, der Opel Ampera-e, der Tesla Model S und der Nissan Leaf.

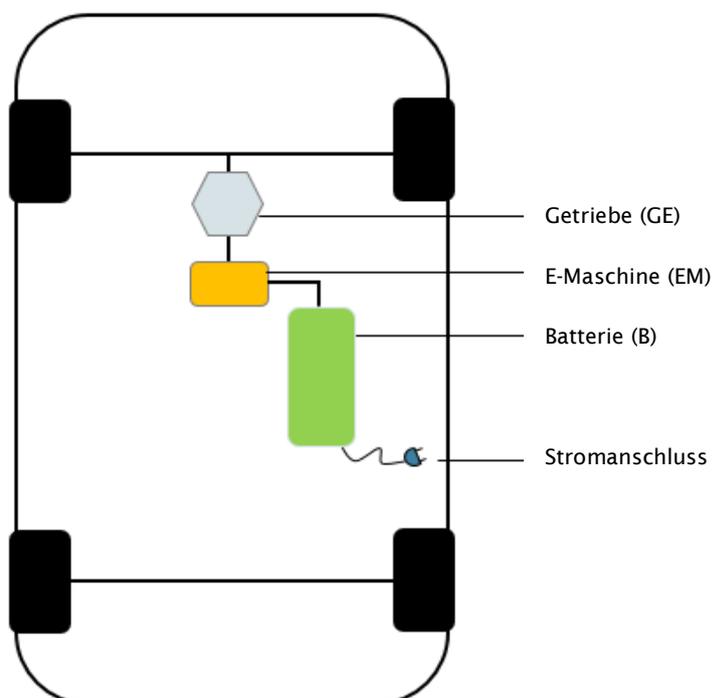


Abbildung 5: Systemschaubild batteriebetriebenes Elektrofahrzeug - Eigene Darstellung (3, S. 8)

2.4.2 Brennstoffzellenbetriebene Elektrofahrzeuge

Dem batteriebetriebenen Elektrofahrzeug steht das brennstoffzellenbetriebene Elektrofahrzeug gegenüber. Auch diese Technologie fand schon im 19. Jahrhundert ihren Anfang.

Als Erfinder der Brennstoffzelle gilt der britische Physiker Sir Williams Robert Grove, der im Jahre 1839 durch Umkehrung von Elektrolyse die damals sogenannte

„Gasbatterie“ erfand (18, S. 295). Zuvor entdeckte Christian Friedrich Schönbein im Jahre 1838, dass bei der Reaktion von Wasserstoff und Sauerstoff elektrische Energie freigesetzt wird (12, S. 106).

Die Grundfunktion einer Brennstoffzelle ist simpel, sie wandelt die im Brennstoff gespeicherte Energie direkt in Elektrizität um. Dabei besteht die Brennstoffzelle aus einer Brenngas- und einer Sauerstoffelektrode. Zwischen diesen beiden Elektroden befindet sich ein fester oder flüssiger Elektrolyt, das kann zum Beispiel eine Säure oder auch eine Lauge sein. Die stromerzeugenden Reaktionen geschehen dann an der Fläche zwischen Elektrode und Elektrolyt (19, S. 2-3).

Ein Fahrzeug welches mit dieser Technik ausgestattet ist, funktioniert ähnlich wie ein serielles Hybridfahrzeug mit zwei Energiespeichern und zwei Energiewandlern. Energiespeicher stellen der Wasserstofftank und die Batterie dar. Als Energiewandler arbeiten die Brennstoffzelle und die E-Maschine. Da der übliche Vorgang von Energieumwandlung von Kraftstoff in mechanische Energie und danach über einen Generator in elektrische Energie entfällt, besitzt die Brennstoffzellentechnologie einen relativ hohen Wirkungsgrad (15, S. 76). Durch zu hohe Kosten eines Brennstoffzellensystems konnte sich diese Art des Elektrofahrzeugs bisher jedoch nicht durchsetzen. Viele Automobilhersteller sehen deshalb die Zukunft im batteriebetriebenen Elektrofahrzeug.

Beispiele für brennstoffzellenbetriebene Fahrzeuge sind der Toyota Mirai, der Hyundai ix35 FCEV und der Mercedes-Benz F-Cell (B-Klasse).

2.5 Komponenten des elektrischen Antriebsstrangs

In diesem Kapitel werden wichtige Komponenten des elektrischen Antriebs näher erläutert. Es soll eine Grundlage zum späteren Verständnis der Total Cost of Ownership Analyse geschaffen werden. Der aktuelle Stand der Technik und verschiedene Bauarten der Komponenten stehen dabei im Vordergrund.

Unter den ausgewählten Bauteilen befindet sich die Batterie, die E-Maschine, der Energiewandler, das Getriebe und die Ladetechnik.

2.5.1 Batterie als Energiespeicher

Eine zentrale Komponente des E-Antriebs ist die Traktionsbatterie. Diese befindet sich seit Jahren im Spannungsfeld verschiedener Anforderungen und wird somit hinsichtlich Lebensdauer, Energiedichte, Zyklenbeständigkeit, Sicherheit, Leistungsdichte und Kosten bewertet (15, S. 104-105).

Die zum heutigen Stand eingesetzte Batterietechnik ist die Lithium-Ionen-Batterie (Li-Ionen). Diese Technologie wurde schon im Jahr 1991 zur Anwendung in mobilen

Endgeräten eingesetzt. Das geringe Gewicht und die hohe Energie sind nur zwei Vorteile die hierbei zu erwähnen sind.

In Abbildung 6 ist der Aufbau und die Funktionsweise einer wiederaufladbaren Lithium-Ionen-Batterie aufgezeigt. Zwischen den beiden Elektroden befindet sich der ionenleitfähige Elektrolyt und ein Separator, welcher die beiden Elektroden voneinander isoliert. Beim Vorgang des Entladens und Ladens laufen einzelne Lithium-Ionen zwischen den Elektroden hin und her. Dabei werden sie in den Aktivmaterialien eingelagert (20, S. 14-15).

Derzeit werden für die Kathode einer Fahrzeugbatterie Lithium-Manganoxide (LMO) und Lithium-Nickel-Oxid (LNO) für Energieanwendungen oder Lithiumeisenphosphat (LFP) für Leistungsapplikationen verwendet. Die Verwendung von Lithium-Kobaltoxid scheidet im Moment aus Kosten- und Sicherheitsgründen aus. Lithium-Ionen-Batterien werden nach Bauart der Batteriezelle unterschieden. Die drei Bauformen Prismatisch-Zellen, Zylindrisch-Zellen und Pouch-Zellen ergeben bei einer Gegenüberstellung keinen eindeutigen Trend zu einem Zelltyp. Einzig die Kostenvorteile in der Herstellung der Pouch-Zellen ergeben einen Vorteil für diese Bauform (14, S. 233-235).

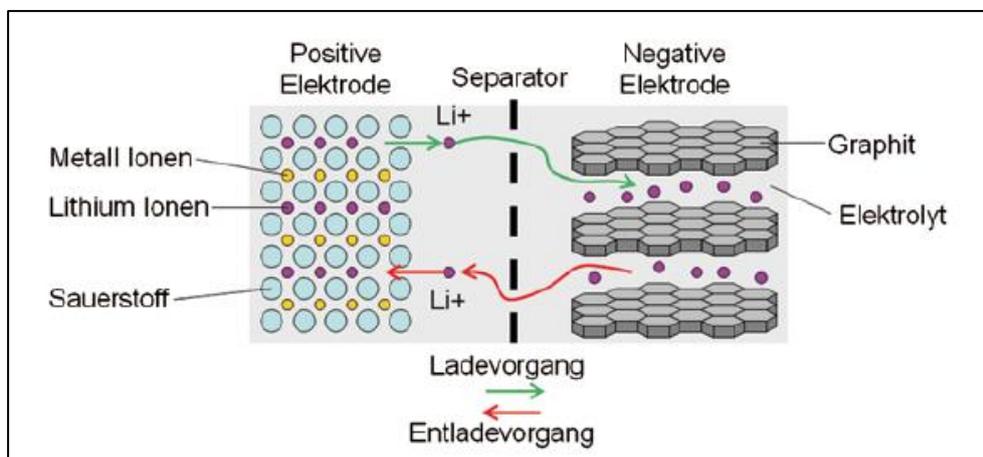


Abbildung 6: Aufbau und Funktionsweise einer Lithium-Ionen-Batterie (14, S. 234)

Besonders wichtige Faktoren hinsichtlich der Energiespeichermethoden sind Kosten und Lebensdauer. Auf beiden Gebieten wird die Forschung und Entwicklung intensiv vorangetrieben, sodass heute davon ausgegangen werden kann, dass die Lebensdauer einer Lithium-Ionen-Batterie bei mehr als zehn Jahren liegt. Auch die Kostenentwicklung verläuft positiv, wodurch hier größeres Einsparungspotential für das Gesamtfahrzeug möglich ist. Abbildung 7 zeigt die geschätzte Kostenentwicklung der Li-Ionen Batterie auf Zellebene bis ins Jahr 2020. Die Kosten auf Systemebene können durch einen Aufschlag von ca. 30 % bis 50 % ermittelt werden und ergeben sich durch Kostenaufschlüsselungen in Produktion der

Elektroden, Zellmontage, Formieren und Testen, Batteriemodulmontage und Batteriepackmontage (21, S. 107–108).

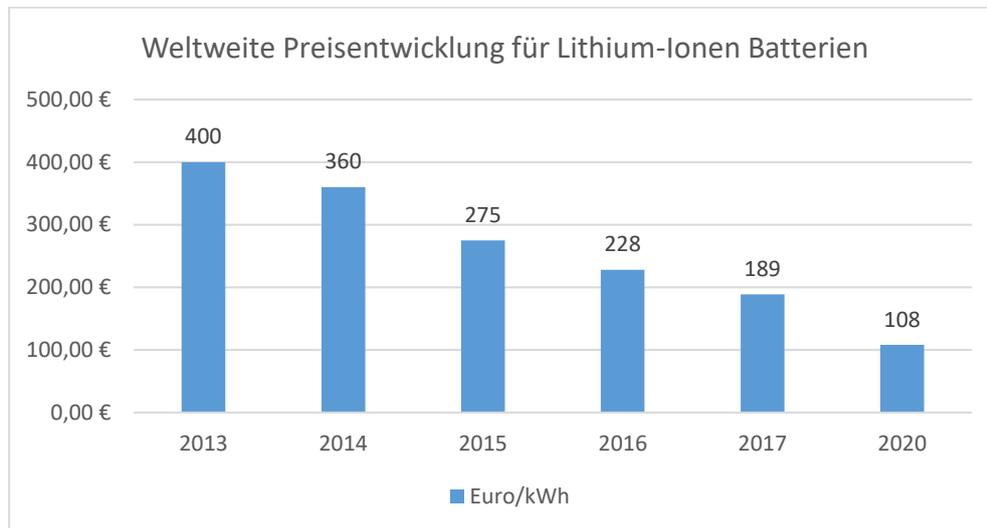


Abbildung 7: Weltweite Preisentwicklung für Lithium-Ionen-Batterien – Eigene Darstellung (22)

2.5.2 E-Maschine als Energiewandler

Die Elektromaschine ist eine weitere Komponente des elektrischen Antriebs. Sie wandelt elektrische Energie in mechanische Energie um, sowie auch umgekehrt. Elektromaschinen können somit im Motor- oder Generatorbetrieb aktiv sein. Durch diese Eigenschaft kann die gleiche Maschine für den Antrieb genutzt werden und gleichzeitig Bremsenergie (Rekuperationsenergie) zurückgewonnen werden (12, S. 25). Für den Betrieb der E-Maschine sind geeignete Leistungselektronik und Steuerelektronik notwendig.

Um die geeignete E-Maschine für ein Elektrofahrzeug zu finden, ist das zu erwartende Fahrprofil von großer Bedeutung. Weitere wichtige Entscheidungskriterien sind Kosten, Fertigbarkeit des Motors, Wartungsfähigkeit, Recyclbarkeit, Lebensdauer, Leistungsdichte, Wirkungsgrad und Materialauswahl (23, S. 269). Für Elektrofahrzeuge werden derzeit vier verschiedene E-Maschinen mit unterschiedlichen Eigenschaften verwendet.

- Asynchronmaschine (ASM)
- Permanentterregte Synchronmaschine (PSM)
- Fremderregte Synchronmaschine (FSM)
- Geschaltete Reluktanzmaschine (SRM)

Der besondere Vorteil der **Asynchronmaschine** liegt vor allem in der einfachen und kostengünstigen Herstellung. Leider besitzt diese gleichzeitig einen schlechten Leistungsfaktor und eine niedrige Effizienz. Ein weiterer Nachteil ist die abfallende Leistungskurve bei hohen Drehzahlen (24). Aus diesem Grund werden Asynchronmaschinen meist in günstigen Hybrid-Systemen, zur Unterstützung des Verbrennungsmotors und der Rückgewinnung von Energie durch den Bremsvorgang, verwendet (25).

Gegenüber der Asynchronmaschine steht die **permanenterregte Synchronmaschine**. Ihre Vorteile beziehen sich auf die kompakte Bauform in Kombination mit einem hohen Wirkungsgrad. Da die Maschine eine geringe Axiallänge besitzt, eignet sich diese auch für Konzepte, bei welchen der Motor in der Getriebeglocke untergebracht wird. Nachteile sind die hohen Schleppverluste bei höheren Drehzahlen, der Aufwand zur Absicherung der Maschine im Fehlerfall sowie die Verfügbarkeit und Kosten des Rohstoffs (Neodym) für den Magnet (24). Dennoch überwiegen derzeit die Vorteile, weshalb heutzutage größtenteils Permanenterregte Synchronmaschinen in Elektrofahrzeugen verbaut werden. Ein Beispiel ist die Dimensionierung für große Drehzahlbereiche mit hohen Wirkungsgraden und hohen Drehmomentdichten und der resultierenden Eignung als Direktantrieb ohne mechanisches Getriebe (23, S. 271).

Eine weitere Bauweise der E-Maschine ist die **fremderregte Synchronmaschine**. Diese benötigt zwar eine längere Bauform im Vergleich zum PSM, bietet dafür allerdings enorme Vorteile bei höheren Drehzahlen. Der erzielbare Wirkungsgrad ist in allen Betriebsbereichen gut. Die FSM zeichnet sich allgemein durch einen hohen Wirkungsgrad bei geringem Volumen aus und besitzt im Vergleich zu Asynchron- und Reluktanzmaschinen das geringste Gewicht (14, S. 178).

Eine Sonderbauform der Synchronmaschine ist die **geschaltete Reluktanzmaschine**. Diese wird auch als „switched reluctance machine“ (RSM) bezeichnet. Der Aufbau dieser Maschine ist vergleichsweise einfach und robust, da diese ohne Magnete und Rotorwicklung auskommt (23, S. 272). Genau darin liegen auch ihre Stärken, welche hohes Leistungsgewicht, kostengünstiger Aufbau, gutes Dauerdrehmoment im Grunddrehzahlbereich, ein sehr hohes Beschleunigungsvermögen und gute Notlaufeigenschaften sind. Nachteile dieser Bauweise sind die hohe Geräuschentwicklung bei Betrieb und starke Drehmoment- und Normalkraftschwankungen. Weiter ist es durch komplexe Regelverfahren schwierig die Leistungselektronik anzupassen (14, S. 181).

Letzten Endes muss die passende E-Maschine anhand des Fahrprofils bestimmt werden. Abbildung 8 zeigt eine Übersicht der bisherigen E-Maschinen, gewichtet nach Kosten, Bauraum und Leistungsdichte.

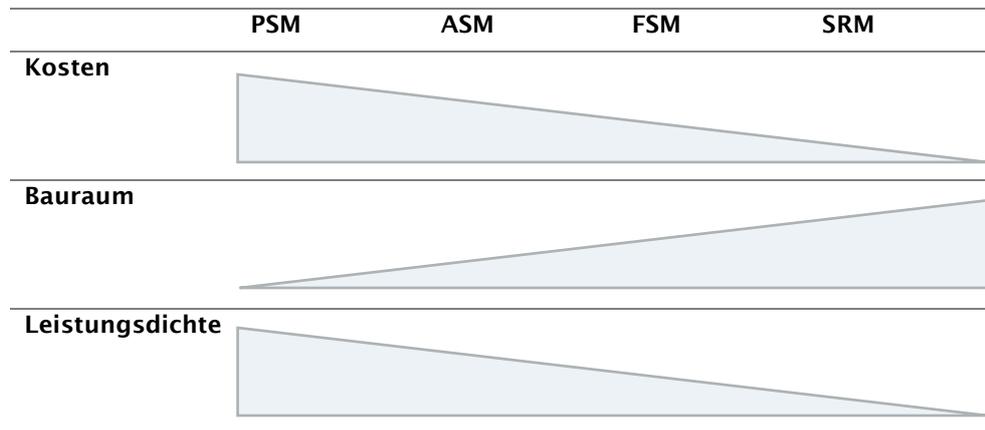


Abbildung 8: Übersicht verschiedener Bauweisen von E-Maschinen

2.5.3 Leistungselektronik (Stromrichter)

Die Leistungselektronik übernimmt eine zentrale Aufgabe im Bereich des elektrifizierten Antriebstrangs. Sie regelt die elektrische Energie aus dem Energiespeicher. Dabei muss sie die Energie an die Anforderungen der E-Maschine anpassen und bereitstellen. D.h. die Leistungselektronik steuert den Leistungsfluss und leistet die bedarfsgerechte und effiziente Anpassung von Spannungen, Strömen und Frequenzen zwischen den verschiedenen elektrischen Komponenten. Zusammengefasst, sie übernimmt Regel- und Steuerungsfunktionen. Die Umformung des elektrischen Stroms kann auf vier verschiedene Arten erfolgen (14, S. 198, 26, S. 41–42).

1. Wechsellspannung in Gleichspannung

Ein Gleichrichter (AC-DC-Konverter) formt aus einer ein- oder mehrphasigen Wechsellspannung eine Gleichspannung (Bsp.: Brückengleichrichter).

2. Gleichspannung in Gleichspannung

Ein Gleichspannungswandler (DC-DC-Konverter) verändert die Höhe der Gleichspannung. Er ist notwendig um von einer Eingangsspannung ein gewünschtes Spannungsniveau zu erreichen. Dieses kann niedriger oder höher sein. Will man die Spannung vermindern, spricht man von einem Tiefsetzsteller (Abwärtswandler oder Buck-Konverter). Will man sie erhöhen von einem Hochsetzsteller (Aufwärtswandler oder Boost-Konverter). Ebenso kann es zu einer Kombination beider Varianten kommen. Dann können Eingangsspannungen nach Belieben hinunter und hinauf gewandelt werden.

3. Gleichspannung in Wechselspannung

Ein Wechselrichter (DC-AC-Konverter) erzeugt aus einer Gleichspannung eine Wechselspannung. Somit wird die Gleichspannung aus dem Hoch-Volt-Netz in die benötigte Spannungsform für den Elektromotor umgewandelt.

4. Wechselspannung in Wechselspannung

Ein Wechselspannungsumrichter (AC-AC-Konverter) wandelt eine vorhandene Wechselspannung in eine für Amplitude und Frequenz unterschiedliche Wechselspannung um.

Die Leistungselektronik ist hinsichtlich einer Erhöhung des Wirkungsgrads von besonderer Bedeutung. Umwandlungsverluste sollen möglichst gering gehalten werden, da sich diese sofort im Gesamtwirkungsgrad und der Reichweite des E-Fahrzeugs niederschlagen. Um die verbleibende Verlustleistung abzuführen, werden unterschiedliche Kühlsysteme (Wasser und Luft) verwendet. Dieser Sachverhalt führt immer wieder zu Diskussionen hinsichtlich der Halbleiterbauelemente. Für den Übergang von Silizium zu Galliumnitrid besteht der Vorteil, dass Galliumnitrid auch bei höheren Temperaturen ohne größeren Kühlaufwand einsetzbar ist. (26, S. 41–42). Derzeit liegt die Versorgung von Gallium weit über dem Bedarf. Doch bei steigender Nachfrage könnte sich dieses Szenario schnell ändern.

2.5.4 Getriebe

Zu den Hauptaufgaben eines Getriebes gehören die Wandlung bzw. Anpassung des Motorenkennfelds an das Bedarfskennfeld, sowie die Auswahl der optimalen Anzahl der Gänge und deren Übersetzung um den Volllastbetrieb an die ideale Zugkrafthyperbel anzupassen. Des Weiteren können der Kraftstoffverbrauch und die Schadstoffemission optimiert werden. Zusätzlich werden Geräuschpegel und Komfort abgestimmt. Der Einfluss der Elektrifizierung trägt vor allem zur Erhöhung der Gesamteffizienz und der Fahrleistung bei. Dabei helfen Funktionen wie Start/Stopp-Automatik, Rekuperation, Betriebspunktverlagerung, elektrisches (An-) Fahren und Boosten, jenen Fahrzeugen, welche mit einem hybriden Antriebsstrang ausgestattet sind. Reine Elektrofahrzeuge können mit Eingang- oder Mehrgang-Getrieben ausgestattet werden. Vorteil eines Mehrganggetriebes ist der optimierte Betrieb hinsichtlich Effizienz, Komfort und Fahrleistung. Zum einen kann durch eine kurze Übersetzung eine höhere Beschleunigungsfähigkeit erreicht werden und zum anderen, durch eine lange Übersetzung, eine höhere Maximalgeschwindigkeiten erzielt werden. Im Vergleich zum Eingang-Getriebe ist das Mehrgang-Getriebe nicht zwangsweise besser. Das liegt vor allem am Schaltenergiebedarf und dem schlechten inneren Getriebewirkungsgrad. Denn um den optimalen E-Maschinen-Wirkungsgrad zu erreichen, muss die Schaltkennlinie den passenden Betriebspunkt durch Wahl des richtigen Gangs erzielen (12, S. 133–143). Es kann dennoch davon ausgegangen

werden, dass der Einbau eines Zwei- oder Dreigang-Getriebes vermehrt auftreten wird.

2.5.5 Ladetechnik

Grundsätzlich unterscheidet man heutzutage zwischen vier unterschiedlichen Ladetechniken mit den dazugehörigen Steckerarten. In Abbildung 9 sind diese dargestellt.



Abbildung 9: Die gängigsten Steckerarten in Deutschland: Schuko (o.l.), CCS (o.r.), Typ 2 oder Mennekes (u.l.) und CHAdeMO (u.I.) (27)

Der erstgenannte Schuko-Stecker, in Abbildung 9 links oben, dient zur Anwendung in den heimischen Steckdosen. Seine Dauerlast ist in der Regel auf 2,4 kW beschränkt. Im Gegensatz dazu erlaubt der einphasige Typ-1-Stecker eine Ladeleistung von bis zu 7,4 kW. Dieser wird jedoch eher in Asien als in Europa verwendet (27). In Europa konnte man mittlerweile eine Einigung auf eine gemeinsame Norm für die Anschlusstechnik zum Aufladen von Plug-in-Hybrid- und Elektrofahrzeugen erzielen. Der dreiphasige Typ-2-Stecker (Mennekes-Stecker) wurde als Standard festgelegt (14, S. 64). Im privaten Anwendungsbereich sind Ladeleistungen bis 22 kW (400 V, 32 A) gängig, während an öffentlichen Säulen Ladeleistungen bis zu 43 kW (400 V, 63 A) möglich sind. Eine weitere Variante ist der Combined Charging System Stecker (der CCS-Stecker). Dieser kombiniert den Typ-2-Stecker mit zwei zusätzlichen Leistungskontakten und einer Schnellladefunktion. Die Ladeleistung beträgt in der Praxis ca. 50 kW. Das CHAdeMO-Schnellladesystem (CHARge de MOve) ist eine japanische Entwicklung und unterstützt Ladeleistungen bis zu 100 kW (27).

An einer weiteren zukunftssträchtigen Innovation, den Ladekomfort für zu Hause zu revolutionieren, arbeitet die Daimler AG. Dabei handelt es sich um die Möglichkeit, das Fahrzeug kabellos aufzuladen. Diese induktive Ladetechnik soll den Umgang mit Elektrofahrzeugen noch komfortabler gestalten. Über ein Magnetfeld wird die

elektrische Energie berührungslos übertragen. Zunächst soll diese Technologie in der Baureihe S500e angewendet werden (28).



Abbildung 10: Induktive Ladetechnologie der Daimler AG (27)

3 Externe Einflussfaktoren auf konventionelle und alternative Antriebssysteme

In diesem Kapitel werden verschiedene Einflussfaktoren die als Treiber für Veränderungen in der Mobilität verantwortlich sind näher beschrieben. Im Wesentlichen wird die Entwicklung der alternativen Antriebe von drei Faktoren beeinflusst. Der erste Einflussfaktor stellt sich aus gesetzlichen Rahmenbedingungen und der Politik zusammen. Durch bestimmte Reglementierungen beeinflusst er die Automobilhersteller und deren Kunden direkt. Der zweite Treiber bezieht sich auf unterschiedliche Kundenanforderungen. Hierbei stehen Digitalisierung, Urbanisierung und Individualisierung im Vordergrund. Den dritten bedeutenden Faktor bildet die Ressourcenverfügbarkeit, die einen großen Anteil in der Entwicklung zu alternativen Antriebssystemen besitzt.

3.1 Gesetzliche Rahmenbedingungen und Programme

Um die, wie schon zu Beginn dieser Arbeit, erläuterten Klimaschutzziele zu erreichen, bemühen sich die Gesetzgeber schon seit langem, Gesetze zur Regulierung des CO₂-Ausstoßes voran zu bringen. Abgezielt wird dabei auf den Umschwung in die Elektromobilität. Im Folgenden wird näher auf die aktuelle Situation in verschiedenen Regionen eingegangen. Der Fokus liegt dabei auf den drei größten Absatzmärkten der Automobilindustrie gemäß Pkw-Neuzulassungen: China, USA und Europa. Verschiedenste regulatorische und fiskalpolitische Instrumente sollen dabei beleuchtet werden.

3.1.1 Situation in Europa

Elektromobilitätsgesetz (EmoG):

Durch das sogenannte EmoG sollen Kommunen in Deutschland dazu angeregt werden, Elektrofahrzeuge im öffentlichen Raum mit Sonderrechten auszustatten. Dazu zählt beispielsweise eine Parkgebührenbefreiung oder die Nutzung von gesonderten Fahrspuren, wie z.B. einer Busspur. Es besteht keine Verpflichtung zur Anwendung des Gesetzes und soll lediglich zur rechtlichen Legitimation einer Bevorzugung von Elektrofahrzeugen dienen. Befristet ist das Gesetz bis in das Jahr 2026 (29).

Maut und Parkgebühren:

In Stuttgart, der Landeshauptstadt Baden-Württembergs besteht bereits die Möglichkeit mit einem Elektrofahrzeug und dem damit verbundenen Sonderparkausweis im gesamten Stadtgebiet kostenlos zu parken. In London hingegen können Fahrzeuge mit alternativem Antriebskonzept kostenlos die Innenstadt befahren und umgehen somit die „London Congestion Charge“ (£11,50), eine City-Maut die zur Begrenzung des Individualverkehrs führen soll (30). Auch

andere Städte wie Mailand (2008), Bologna (2006) oder Stockholm (2003) besitzen bestimmte Strecken, die mit einer Maut belegt sind. Auch wenn hier der Umweltgedanke nicht im Vordergrund stand, sondern die Finanzierung des Straßenbaus, ist dies ein angenehmer Nebeneffekt für die Automobilwirtschaft und die Luftqualität in den Städten (15, S. 14–16) .

Kaufprämien:

In Deutschland wird seit dem 2. Juli 2016 der Kauf eines Elektrofahrzeugs finanziell gefördert. Käufer von rein elektrischen Fahrzeugen werden mit einer Prämie von bis zu 4.000 €, Käufer eines Plug-in-Hybrid Fahrzeugs mit einer Prämie in Höhe von bis zu 3.000 € belohnt. Die Förderung wird vom Staat und der Industrie je zur Hälfte getragen. Diese Subventionen werden so lange ausgegeben, bis die veranschlagten 600 Millionen Euro an Bundesmitteln aufgebraucht sind, enden jedoch spätestens im Jahr 2019 (31).

In Frankreich wird ein Kauf eines Elektrofahrzeugs derzeit mit bis zu 6.300 € gefördert. In Verbindung mit der Verschrottung eines Dieselfahrzeugs kommen nochmals 3.700 € hinzu (32). Auch in Norwegen können beim Kauf eines Elektrofahrzeugs hohe Förderungen geltend gemacht werden. So werden dort die 25 % Mehrwertsteuer und die hohen Zulassungssteuern in Abhängigkeit des CO₂-Ausstoßes erlassen (33).

Einen Zuschuss von 35 % des Kaufpreises bis maximal £ 4.500 erhält man in England beim Kauf eines Elektrofahrzeuges bzw. bei Plug-in-Hybriden. Motorräder mit einem CO₂-Ausstoß von 0g/km werden mit bis zu £ 1.500 gefördert (34).

Tabelle 3: Staffelung der Subventionen für E-Fahrzeuge am Beispiel London - Eigene Darstellung (34)

Kategorie	Co2-Emission	Elektr. Reichweite	Prämie	Max. Prämie
1	Unter 50 g/km	bis zu 70 Meilen	35% der Kosten	£ 4500
2	Unter 50 g/km	10-69 Meilen	35% der Kosten	£ 2500
3	50-75 g/km	bis zu 20 Meilen	35% der Kosten	£ 2500
Motorrad	0 g/km	bis zu 31 Meilen	20% der Kosten	£ 1500
Mofa	0 g/km	bis zu 19 Meilen	20% der Kosten	£ 1500
Lieferwagen	Unter 75 g/km	bis zu 10 Meilen	20% der Kosten	£ 8000

Kfz-Steuer:

Für Elektrofahrzeuge, mit Erstzulassung zwischen dem 18. Mai 2011 und dem 31. Dezember 2020, besteht in Deutschland eine Steuerbefreiung für die nächsten 10 Jahre. Fahrzeuge mit Erstzulassung bis zum 17. Mai 2011 sind 5 Jahre lang von der

Steuer befreit (31)(35). PHEV-Fahrzeuge werden nach deren Anteil an Emissionsausstoß versteuert. In anderen europäischen Ländern werden Fahrzeuge nach dem Bonus-Malus-System versteuert, was sich für den Verbraucher durchaus negativ bemerkbar macht. So muss z.B. in den Niederlanden ab einem CO₂-Ausstoß von 232 gCO₂/km jedes weitere Gramm mit einem Betrag von 110 € versteuert werden. Weitere Länder in denen die Anschaffung eines Fahrzeugs, mit hohem CO₂-Ausstoß kostspielig werden kann, sind Portugal, Spanien oder Finnland (36). In Großbritannien sind reine E-Fahrzeuge von der Steuer befreit. Ähnlich wie in Deutschland werden PHEV am Emissionsausstoß gemessen und besteuert.

Fahrverbote:

In Paris existiert seit dem 1. Juli 2016 eine „Umweltzone“. In dieser Zone herrscht ein zeitlich begrenztes Fahrverbot von montags bis freitags von 8.00 Uhr bis 20.00 Uhr. In dieser Zeit dürfen Fahrzeuge mit Erstzulassung vor dem 1. Januar 1997 bzw. Motorräder mit Erstzulassung vor dem 1. Juni 1999 dort nicht fahren. Auch für Touristen mit ausländischem Kennzeichen gilt diese Regelung ab Februar 2017. Bei Missachtung werden Geldbußen in Höhe von 68 € fällig. Des Weiteren gibt es in Paris neuerdings einen „Autofreien Sonntag“, der auf den Champs-Élysées eingeführt wurde (37).

Eine weitere Besonderheit besteht während eines ausgerufenen Feinstaubalarms. Denn dann gilt, nicht wie in Stuttgart ein Verweis auf öffentliche Verkehrsmittel, sondern ein allgemeines Fahrverbot von dem, abwechselnd nach geraden und ungeraden Kennzeichen, alle Pkw-Besitzer betroffen sind. Ausnahmen sind Fahrzeuge, die mit mehr als drei Personen besetzt sind oder Fahrzeuge mit einem Elektro- oder Hybridantrieb. Ein weiterer Unterschied zum feinstaubbelastenden Stuttgart ist die dann kostenlose Nutzung der öffentlichen Verkehrsmittel (38).

Auch andere Länder mit großen Metropolen wie England (London) oder Spanien (Madrid) spielen mit dem Gedanken eines Fahrverbots in gewissen Umweltzonen.

In Deutschland existieren gewisse Fahrverbote durch Einteilung von Fahrzeugen in bestimmte Schadstoffgruppen und dementsprechenden Umweltplaketten. Im Moment bestehen vier verschiedene Schadstoffgruppen. Wichtig ist hierbei: je geringer die Schadstoffemission, desto höher ist die Schadstoffgruppe. Die sogenannten Feinstaub-Plaketten gibt es in den drei verschiedenen Farben rot, gelb und grün. Keine Plakette oder Plaketten in den Farben rot und gelb werden von Fahrzeugen, welche der sogenannten Schadstoffklasse Euro 3 oder schlechter angehören, getragen. Eine grüne Umweltplakette kennzeichnet hingegen Fahrzeuge mit geringen Emissionswerten. Dazu zählen Dieselfahrzeuge ab der Schadstoffklasse Euro 3 plus Partikelfilter und Benzinfahrzeuge mit geregelter Katalysator nach Anl. XXIII StVZO bzw. Euro 1 oder besser (39). Die Einführung einer weiteren Plakette der

Farbe Blau ist derzeit stark umstritten. Nachdem man sich im Oktober 2016 gegen eine solche Umweltplakette entschieden hatte, könnte diese nun doch früher als gedacht eingeführt werden. Dies würde jedoch bedeuten, dass ca. 13 Millionen Dieselfahrzeuge davon betroffen wären und nicht mehr in bestimmten Zonen der Innenstadt fahren dürften. Lediglich 500.000 Fahrzeuge sind im Stande die blaue Umweltplakette zu tragen (40).

EU-Flottengrenzwerte:

Durch die Europäische Abgas Gesetzgebung werden Emissionswerte seit 1992 stufenweise verschärft. Mit Einführung der Schadstoffklasse Euro 3 wird auch der Startvorgang des Motors bei der Emissionsmessung mit einbezogen. Seit 2005 ist eine On-Board-Diagnose Pflicht. Seit September 2015 ist die neue Schadstoffklasse Euro 6 für alle neuen Pkw verbindlich. Damit liegt der Grenzwert für Stickstoffoxide bei 60 mg/km (41).

Die Europäische CO₂-Gesetzgebung limitiert den CO₂-Ausstoß in g/km. Seit 2015 steht dieser flottenübergreifend für neu zugelassene Fahrzeuge bei 130 g/km. Ab dem Jahr 2020 liegt dieser Wert bei 95 g/km (42).

Erneuerbare Energie Gesetz (EEG):

Das EEG ist seit dem 1. April 2000 gültig. Es verfolgt das Ziel, eine nachhaltige Entwicklung der Energieversorgung zu ermöglichen. Ziele für dieses Vorhaben wurden bis 2050 festgelegt. So soll 2020 mindestens 35 % des Stroms aus erneuerbaren Energien stammen. Im Jahr 2030, 2040 und 2050 sollen diese Ziele auf 50 %, 65 % und 80 % angepasst werden (43). Somit spielt das EEG eine große Rolle bei der Beschaffung von Strom aus erneuerbaren Energien, um Elektrofahrzeuge zu speisen. Damit verbunden ist die dann deutlich verbesserte Umweltbilanzierung jener Fahrzeuge, hinsichtlich einer Well-to-Wheel (WtW) Analyse⁵.

Dienstwagenbesteuerung:

In Deutschland werden Elektro-Dienstwagen durch Steuervorteile bevorzugt. So dürfen Fahrer eines solchen Fahrzeugs die Kosten für das Batteriesystem vom Listenpreis abziehen. Bis Ende 2014 ergab sich dieser Betrag aus 450 €/KWh der Batteriekapazität. Maximal durften 9.500 € abgezogen werden. Diese Abzugspauschale wird jedoch bis zum Jahr 2023 jährlich um 50 €/KWh gekürzt (45). Für das Jahr 2017 bedeutet dies also nur noch 300 €/KWh und maximal 8.000 €.

⁵ Analyse der Gewinnung und Bereitstellung von Treibstoff bzw. Energieträgern bis zur Umwandlung in Bewegungsenergie. Der Hauptfokus liegt in der Ermittlung aller direkten und indirekten Emissionen über den kompletten Pfad der Bereitstellung eines Energieträgers (44).

Es entsteht dabei also lediglich ein Steuervorteil, indem der höhere Fahrzeugpreis, im Vergleich zum konventionellen Verbrenner Fahrzeug, gedrückt werden kann.

3.1.2 Situation in den USA

Auch in den USA stehen große klimapolitische Änderungen bevor. Ziele dabei sind Reduktionen der Treibhausgasemissionen um 40 % bis zum Jahr 2030 und um 80 % bis zum Jahr 2050 im Vergleich zu Emissionswerten des Jahres 2005. Die Regierung sieht auch hier ein großes Potential von Einsparmöglichkeiten in der Automobilindustrie und versucht deshalb die E-Mobilität durch verschiedene Programme aber auch gesetzliche Regulierungen intensiv zu fördern. Jährlich soll der prozentuale Anteil von „electric vehicle“ (EV) am Gesamtmarkt um ca. 4 % steigen. Darunter fallen Fahrzeuge der Kategorie BEV, PHEV und REEV.

Kaufprämien:

Ähnlich wie in Deutschland gibt es auch in den USA beim Kauf eines Elektrofahrzeugs gewisse Kaufprämien in Form von einer Steuergutschrift. Derzeit beläuft sich die Höhe dieser Gutschrift auf bis zu 7.500 \$. In Bundesstaat New York wird der Kauf eines Elektrofahrzeugs, Plug-in-Hybrid oder Brennstoffzellenfahrzeugs zusätzlich mit einem Zuschuss von bis zu 2.000 \$ gefördert (46). Die Gutschrift in Höhe von 7.500 \$ ist jedoch vom Gesetzgeber auf 200.000 je Automobilhersteller limitiert (47).

New York Clean Pass Programm:

Mit dem „New York Clean Pass Program“ versucht die Regierung insbesondere Pendler aus Long Island zur Nutzung von energieeffizienten Fahrzeugen anzutreiben. So dürfen Teilnehmer des Programms Sonderfahrspuren nutzen, welche normalerweise nur für Verkehrsteilnehmer mit zwei oder mehreren Insassen, Bussen und Motorrädern vorgesehen sind. Diese Spuren können dann exklusiv an Wochentagen von 6.00 bis 10.00 Uhr und von 15.00 bis 20.00 Uhr benutzt werden. Zu anderen Uhrzeiten sind diese Spuren wieder für alle Verkehrsteilnehmer befahrbar (48).

Allgemeine Abgaskategorien:

In den USA sind über die Jahre verschiedene Abgaskategorien entstanden, welche in Abbildung 11 dargestellt sind. Es wird zwischen bundesstaatlichen Normen und kalifornischen Normen unterschieden, denn nur der Staat Kalifornien ist in der Lage eigene unabhängige Emissionsstandards festzulegen. Diese Standards sind im Moment in Kalifornien und neun weiteren Bundesstaaten (Connecticut, Maine, Maryland, Massachusetts, New Jersey, New York, Oregon, Rhode Island, Vermont) aktiv. 28 % der Neuwagenzulassungen in den gesamten USA entfallen auf diese Bundesstaaten (49).

Zero Emission Vehicle:

Unter dem Programm „Zero Emission Vehicle“ (ZEV) sind Automobilhersteller dazu gezwungen, einen gewissen Prozentsatz ihres Gesamtabsatzvolumens an Elektrofahrzeugen zu verkaufen. Im Modelljahr 2018 liegt dieser bei 4,5 %. Für das Jahr 2025 sind bisher 15 % festgelegt (50) .

Abgaskategorien in den USA	
TLEV	(Transitional Low Emission Vehicle) Seit 2004 abgelaufen
LEV	(Low Emission Vehicle) Standard den alle Pkw ab 2004 landesweit erfüllen müssen
ULEV	(Ultra Low Emission Vehicle) Fahrzeuge sind 50 % sauberer als der Mittelwert in einer neuen MJ-Baureihe
SULEV	(Super Ultra Low Emission Vehicle) Fahrzeuge sind 90 % sauberer als der Mittelwert in einer neuen MJ-Baureihe
PZEV	(Partial Zero Emission Vehicle) Fahrzeuge erfüllen SULEV Standards und haben 15-jährige/150.000 Meilen Garantie sowie keine Kraftstoffverdunstung
AT PZEV	(Advanced Technology PZEV) Fahrzeuge mit komprimiertem Erdgas oder Hybridantrieben. Erfüllen alle SULEV Standards und haben eine 15-jährige/150.000 Meilen Garantie sowie keine Kraftstoffverdunstung
ZEV	(Zero Emission Vehicle) Elektrofahrzeuge und Brennstoffzellenfahrzeuge, die keine schädliche Abgasemission besitzen und 98% sauberer als das durchschnittliche Modell eines Fahrzeugjahrgangs

Abbildung 11: Abgaskategorien in den USA - Eigene Darstellung (3, S. 19)

Im Vergleich zu der EU Norm Euro 6 mit maximal 80 mg/km, erlaubt die Norm der US-Umweltbehörde EPA ein Limit von 70 mg/Meile⁶ (51).

Flottenemissionsgrenzwerte:

Seit 2015 gilt in den USA ein Emissionsgrenzwert für den Flottenverbrauch von 172 gCO₂/km (52, S. 56).

NYC Clean Fleet Programm:

Mit diesem Programm versucht New York City die Reduzierung der Treibhausgasemissionen aus Flottenemissionen der kommunalen Fahrzeuge voran zu treiben. Bis 2025 sollen deshalb 2.000 EVs dem städtischen Fuhrpark hinzugefügt werden. Das New York Police Department und das New York City Department of

⁶ Eine Meile entspricht ca. 1,6 km

Sanitation sind zwei der größten Einrichtungen, gemessen am Fuhrparkvolumen. Bis 2025 sollen ca. 50 % dieser Emissionswerte reduziert werden (53).

3.1.3 Situation in China

Aufgrund des starken Wirtschaftswachstum herrscht in China eine extrem schlechte Luftqualität, welche durch das hohe Verkehrsaufkommen und der großen Industrieanammlung ausgelöst wird. Folge sind die stetig wachsenden Gesundheitsrisiken. Mithilfe von gesetzlichen Grenzwerten der Luftschadstoffe versucht China dem Problem Einhalt zu gebieten. Da China der größte und schnellst wachsende Automobilmarkt der Welt ist, versucht die Regierung besonders durch Regularien hinsichtlich der Beschränkung des CO₂-Austoßes von Automobilen dem Problem entgegen zu wirken. Bis zum Jahr 2020 sollen bereits fünf Millionen „New Energy Vehicle“ den chinesischen Markt befahren. Die folgenden Punkte sollen Gesetze, Normen und Beschränkungen näher beleuchten.

Allgemeine Abgasnormen:

Vor dem Jahr 2005 gab es in China keine Abgasnormen. Das lag in erster Linie daran, dass bei den geringen Einkommen der Bevölkerung keine hochwertigen abgasgereinigten Fahrzeuge absetzbar waren.

Erst seit dem Jahr 2005 kam es zu einer landesweiten Einführung der Euro 2 Norm. In Großstädten wurde zusätzlich eine verschärfende Maßnahme bis 2009 auf die Euro 4 Norm vorgenommen (15, S. 23).

Die derzeitige Abgasnorm „National V“ (eine weitgehend vergleichbare Norm zur Euro 5) wird ab 2020 von der „National VI“ Norm abgelöst. In Beijing soll diese Norm schon ab 2018 starten. Durch die Einführung sollen nochmals 30 % an Emissionen reduziert werden (54). Ein weiterer Ansatz zur Reduzierung des CO₂-Austoßes ist eine Vorgabe des durchschnittlichen Kraftstoffverbrauches. Somit fordert die chinesische Regierung 2015 einen durchschnittlichen Kraftstoffverbrauch von 6,9 L/100 km, was einem Ausstoß von 164 gCO₂/km entspricht. 2020 soll dieser auf 5,0 L/100 km (120 gCO₂/km) gesenkt werden (55).

Kaufprämien:

Eine staatliche Förderung für die sogenannten „New energy vehicles“ (NEVs) besteht in China seit 2009. Dort werden Käufer mit Subventionen zwischen 35.000 Yuan und 60.000 Yuan (4.700 € bis 8.100 €) unterstützt (32). Ähnlich wie in den USA führen lokale Subventionen zu noch größeren Summen. So kann bei einem Kauf eines NEVs eine „Kaufprämie“ von bis zu 90.000 Yuan (12.000 €) geltend gemacht werden. Im Durchschnitt werden ca. 7.300 € pro Auto bezuschusst (56). Ab dem Jahr 2017 werden diese Subventionen jedoch schrittweise gekürzt und enden mit dem Jahr 2020 (57).

Fahrverbote:

Fahrverbote für Innenstädte werden in China zukünftig zunehmen. In Beijing existiert bereits ein Fahrverbot für ortsfremde Fahrzeuge, die während der Stoßzeiten nicht in die Innenstadt fahren dürfen (58).

Wird ein Smogalarm ausgerufen, bedeutet dies zugleich ein Fahrverbot für alle Fahrzeuge. Ausnahmen sind Kennzeichen mit der richtigen Endziffer. Ähnlich wie in Frankreich besteht dann ein abwechselndes Verbot für gerade und ungerade Endziffern des Kennzeichens. Sogar 80 % aller chinesischen Dienstwagen sind von dieser Regelung betroffen. Elektrofahrzeuge sind davon ausgenommen und können wie gewohnt die Stadt befahren (59). Des Weiteren wird das Thema „Mautgebühr“ für Städte oder festgelegte Umweltzonen stark diskutiert.

Zulassungsbeschränkungen:

Einen starken Anreiz zum Kauf eines NEVs setzt die Stadt Beijing mit einem Losverfahren für Pkw-Zulassungen. Dabei werden monatlich max. 20.000 Zulassungen gewährt, welche sich in 88 % privater Fahrzeuge, 10 % Betriebsfahrzeuge und 2 % Transportdienstleister aufteilen. New energy vehicle sind von der Zulassungsbeschränkung befreit und bieten somit einen extremen Vorteil gegenüber konventionellen Fahrzeugantrieben (60).

Gesetz „Elektroquote“:

Das chinesische Industrieministerium hat für 2018 einen Gesetzentwurf veröffentlicht, nachdem Automobilhersteller für 8 % ihrer verkauften Fahrzeuge Kreditpunkte sammeln müssen. Diese Kreditpunkte können nur durch den Verkauf von Elektrofahrzeugen und Plug-in-Hybriden erreicht werden. So kalkulieren die Hersteller derzeit mit vier Punkten für ein E-Fahrzeug und zwei Punkten für einen Hybriden (61). Können diese Verkaufsquoten jedoch nicht eingehalten werden, so droht eine Drosselung der Produktion oder der Zukauf von weiteren Kreditpunkten. Für die Jahre 2019 und 2020 soll die Elektroquote auf 10 % bzw. 12 % angehoben werden (62).

3.1.4 Zusammenfassung

Der Umbruch in die Elektromobilität ist in vollem Gange. Spürbar durch Gesetzgebungen, Regelungen und Programmen in Europa, den USA und China. Besonders die Volksrepublik China, mit dem Stimmmerkmal als größter Automobilmarkt der Welt, treibt die Automobilindustrie zu innovativen und zeitnahen Lösungen, E-Fahrzeuge in großer Zahl zu produzieren und abzusetzen. Tabelle 4 zeigt eine Zusammenfassung der Kaufprämien für Fahrzeuge mit alternativem Antriebskonzept.

Tabelle 4: Zusammenfassung Kaufprämien in Euro

Europa	USA	China
DE: 3.000 € - 4.000 € F: 6.300 € - 10.000 € GB: 3.000 € - 5.300 €	2.700 € - 8.200 € (NY: + 2.700 €)	4.700 € - 12.000 €

3.2 Einfluss von Kundenanforderungen

Im Laufe der Zeit musste sich die Automobilindustrie immer wieder neuen Kundenanforderungen anpassen. Der globale Kunde fordert seit jeher Innovationen bei nahezu gleichbleibenden Preisen. Die Urbanisierung, Digitalisierung und Individualisierung sind drei der wichtigsten Einflussfaktoren in der Automobilbranche. Um den aktuellen Stand und kommende Trends von Kundenanforderungen und deren Zusammenhang besser zu verstehen, werden diese Punkte näher erläutert.

3.2.1 Urbanisierung

Die Urbanisierung kann als eine Art Prozess der Ausbreitung von städtischen Lebens- und Verhaltensweisen betrachtet werden. Darunter fallen z.B. Konsummuster und Wertvorstellungen. Es besteht eine Abgrenzung zum Begriff „Verstädterung“, da dieser nur den demografischen Aspekt darstellt. Urbanisierung besitzt zusätzlich sozialpsychologische und sozioökonomische Bestandteile. Die Verstädterung bleibt jedoch ein wichtiges Element der Urbanisierung (63).

Der Globale Wandel mit dem Trend zu „Megacities“⁷ ist in vollem Gange. So lebten um 1900 ca. 10 % der Weltbevölkerung in Städten. Heute liegt diese Zahl bei mehr als 54 % und im Jahr 2050 voraussichtlich bei ca. 65 % (Abb. 12). Dies bedeutet, dass ca. 2,8 Mrd. Menschen mehr in den Städten leben werden als noch im Jahre 2010 (Abb. 12/13). Als heimlicher Wendepunkt des globalen Wandels wird das Jahr 2007 angesehen, da von dort an zum ersten Mal mehr Menschen in Städten als auf dem Land lebten (64, S. 6). Dieser Wandel ist ausschlaggebend für einen enormen Anstieg des Pkw-Bestandes in Städten. Ein Auto dient vor allem auch in Großstädten als ein privates Rückzugsgebiet, fern von überfüllten U-Bahnen und Busverbindungen.

⁷ Bevölkerungsanzahl größer 10 Mio. Einwohner

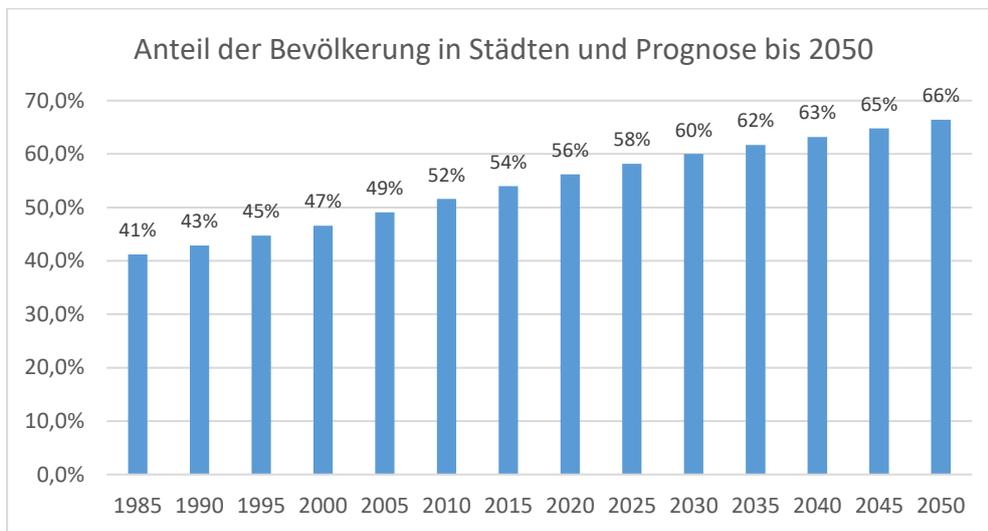


Abbildung 12: Anteil der Weltbevölkerung in Städten und Prognose bis 2050 - Eigene Darstellung (65)

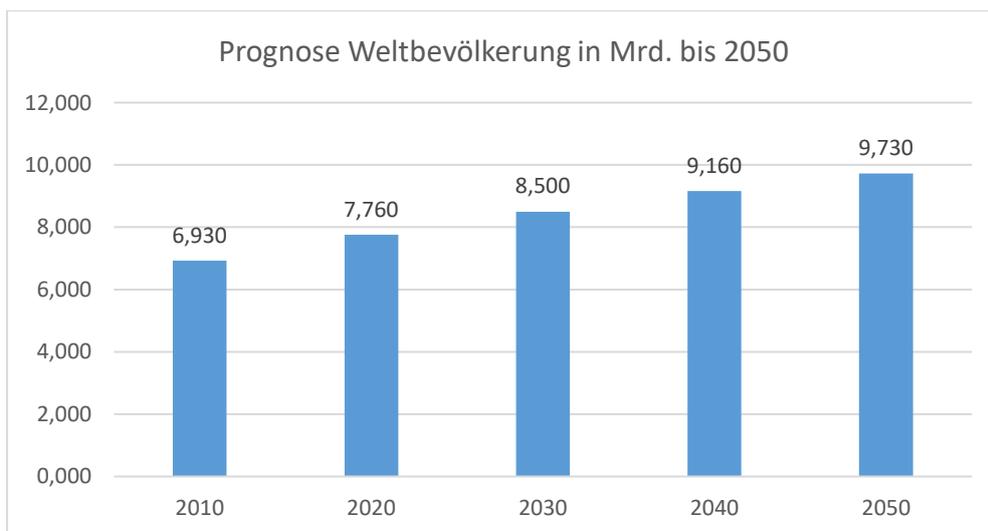


Abbildung 13: Prognose Weltbevölkerung bis 2050 - Eigene Darstellung (66)

Das Bundesverkehrsministerium rechnet im Pkw-Verkehr mit einem Zuwachs von ca. 10 % bis zum Jahr 2030 (67). Um den damit verbundenen Mehrwert an Schadstoffemissionen zu reduzieren, muss in alternative Energie- und Antriebstechnologie investiert werden.

Um die rasante Zunahme des Personenverkehrs zu beherrschen, werden verschiedenste Innovationen hinsichtlich Technik und der Nutzung von Automobilen notwendig sein. Autonomes Fahren, Car-Sharing und intelligentes Parken sind sicherlich drei wichtige Entwicklungen um der Urbanisierung gerecht zu werden. Mit den Car-Sharing Programmen „Car2go“ von der Daimler AG und „DriveNow“ von BMW und SIXT konnten sich bereits zwei Automobilkonzerne erfolgreich am Markt

positionieren. Andere Hersteller wie Audi und Volkswagen wollen nachziehen. Angesichts des Platzmangels und der steigenden Anzahl an Fahrzeugen ist Car-Sharing ein Mobilitätskonzept, welches dieser Problematik entgegenwirken kann.

Inwieweit und in welcher Geschwindigkeit sich dieser Ansatz „Nutzen statt Besitzen“ durchsetzen wird, ist noch nicht absehbar. Er könnte jedoch dazu verhelfen den Pkw-Bestand bei gleicher Beförderungsleistung zu verringern und so der Prognose steigender Fahrzeugzahlen zu entgehen (4, S. 23). Besonders der Einfluss von Elektromobilität ist hinsichtlich CO₂-Grenzwerten und Umweltzonen ausschlaggebend. Damit verbunden ist der Aufbau einer großen Ladeinfrastruktur zur optimalen Nutzung von Car-Sharing Programmen auf Basis emissionsfreier Fahrzeuge.

3.2.2 Digitalisierung

Die Digitalisierung spielt auch in der Automobilbranche eine übergeordnete Rolle. Die stärksten Wachstumstreiber sind Fahrassistenzsysteme, Sicherheitsdienstleistungen, Angebote der Informations- und Unterhaltungsindustrie sowie Fahrzeug- und Mobilitätsmanagement. Der demografischen Wandel und die Urbanisierung treiben die Industrie zusätzlich voran. In einem Markt mit alternder Kundschaft wird z.B. das autonome Fahren ein interessantes Angebot bieten. Anstatt passiv Zeit zu verbringen um das Fahrzeug zu lenken, wollen Fahrer ihre Zeit aktiv und sinnvoll nutzen. Dabei wird der Fahrer zum Konsument und Themen wie Sicherheit, Effizienz, Information und Unterhaltung rücken noch stärker in den Vordergrund. Unterschieden wird dann zwischen Endkunde und Geschäftskunde. Denn der eine erwartet eine einfache und unterhaltsame Nutzung von Mobilität, während sich der andere eine effiziente und kostenoptimierte Fahrt wünscht (68).

Durch intelligente Verkehrssteuerung sowie dem vernetzen und autonomen Fahren, ergeben sich folgende Chancen der Digitalisierung.

1. Die **Steigerung der Verkehrseffizienz** durch „Connected Cars“ und automatisiertes Fahren. Infolge des ständigen Austauschs der vernetzten Fahrzeuge kann die aktuelle Verkehrslage und Routenführung besser koordiniert werden. Als Resultat können Stau und Stauentstehung reduziert und der Verkehrsfluss optimiert werden (69). Das Start-up Unternehmen „ally“ in Berlin zeigt mit deren App bereits erfolgreich, dass diese Idee selbst ohne autonome Fahrzeuge funktioniert. Dabei informiert die App in Echtzeit über Haltestellen und Live-Updates für eine optimale Fahrt durch die Stadt. Neben Bahnen und Bussen sind auch die aktuellen Car-Sharing Programme DriveNow und Car2Go ein Teil des Angebots (70).

2. Die **Erhöhung der Verkehrssicherheit** durch den Ausbau verbesserter Assistenzsysteme. Unfallstatistiken zeigen, dass die Hauptursache von Verkehrsunfällen das menschliche Versagen ist. Dabei stehen meist überhöhte Geschwindigkeiten oder Unachtsamkeit an oberster Stelle. Genau hier kann durch Entwicklung und Zusammenführung der bisherigen Assistenzsysteme im Zusammenspiel mit vernetztem Fahren eine enorme Reduzierung von Verkehrsunfällen erreicht werden. Selbst in einem Mischbetrieb mit nicht automatisierten Fahrzeugen könnte diese Entwicklung zu einer sicheren Verkehrslage führen (69).

3. Die **Reduzierung mobilitätsbedingter Emissionen** durch Minimierung des Kraftstoffverbrauchs als Folge von optimiertem Verkehrsfluss durch vernetztes und automatisiertes Fahren. Dieser Ansatz soll den zähfließenden Verkehr oder Stau, vor allem zur Primetime, bei Arbeitsbeginn und Feierabend, verhindern. Dadurch kommt es zu weniger Brems- und Beschleunigungsvorgängen, was wiederum zu geringeren Kraftstoffverbrauch und Emissionswerten führt. Besonders Mobilitätskonzepte mit elektrischen Antrieben profitieren davon. Die Reichweite und somit ein entscheidender Verkaufsfaktor kann in Folge dieser Optimierung entscheidend ausgebaut werden (69). Ein weiterer Gedanke dabei ist das automatische bzw. induktive Laden auf bestimmten Teilabschnitten der Straße während der Fahrt.

Im Zeitalter des Smartphones und der rasanten Entwicklungsgeschwindigkeit der Geräte, fordern auch die Kunden in der Automobilindustrie eine sichtbare Entwicklung hinsichtlich der Digitalisierung. Das Auto soll zum Kommunikationscenter werden und immer mehr Features zur Bedienung und Unterhaltung bieten.

Die Steuerung über einen Bildschirm im Armaturenbrett wird sich zunehmend ausbreiten. In Folge von Head-up-Displays wird die Windschutzscheibe zum Infoscreen und die Sprachsteuerung sowie die Gestensteuerung werden klassische Bedienelemente verdrängen (68). In Kombinationen mit autonom fahrenden Autos wird sich der Anspruch an Unterhaltungselektronik verändern. Das Fahrzeug soll in Zukunft Streamingdienste für Musik und Film, Videokonferenzen oder auch Möglichkeiten für Kaufentscheidungen (In-Vehicle-Commerce) zur Verfügung stellen. Die Anforderungen werden wahrscheinlich einen Ersatz oder eine Ergänzung zum eigenen Smartphone beinhalten.

Fahrzeughersteller wie BMW und Daimler haben bereits vielversprechende Projekte umgesetzt. Beispielweise bietet BMW durch „ConnectedDrive“ eine Vielzahl von Apps

an, welche die Nutzer während der Fahrt informieren und unterhalten (71). Das Programm „Mercedes me“ der Daimler AG befähigt den Fahrer über eine integrierte Sim-Karte durch das Fahrzeug zu kommunizieren. Durch einen Datenaustausch können verschiedene Dienstleistungen in Anspruch genommen werden (72). Smart und DHL verfügen über ein weitere Initiative die vorerst als Pilotprojekt läuft. Dabei können Smartfahrer mit Hilfe einer App Pakete mit Terminvereinbarung in den Kofferraum liefern lassen (73).

Es ist davon auszugehen, dass dieser Trend weiterhin stark zunimmt, besonders durch die steigende Anzahl an Fahrzeugen mit Internetverbindung (Abb. 14).

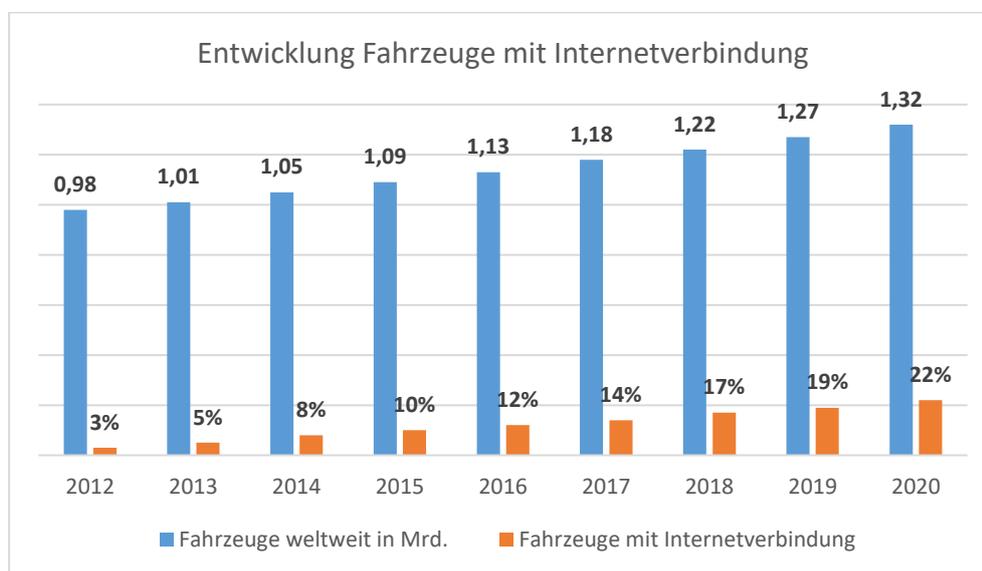


Abbildung 14: Entwicklung Fahrzeuge mit Internetverbindung - Eigene Darstellung (74)

Durch die hohen Kundenanforderungen werden Entwicklungen hinsichtlich Entertainment und Kommunikation den schnellsten und größten Innovationsschwung mit sich bringen. Zugleich müssen jedoch auch IT-Sicherheitsprogramme von Automobilherstellern entworfen werden, um Fahrzeuge vor Hackerangriffen zu schützen. Im Trend der Vernetzung und Digitalisierung lauern ebenso Gefahren wie Möglichkeiten.

Handlungsbedarf ist dahingehend besonders wichtig, da die vernetzten Fahrzeuge im Falle einer Infizierung von schädlichen Softwareviren das komplette Netz der Connected Cars in Gefahr bringen. Prinzipiell bedeutet dies, dass die Hersteller selbst zu Entwicklern und Anbietern für Netzwerk- und IT-Dienstleistungen werden (68). Damit stehen sie in direkter Konkurrenz zu Unternehmen wie Google oder Apple.

Mögliche neue Dienste rund um das vernetzte Fahren sind Mediaagenturen, Kundencenter, Werkstätten, Anlagelieferanten, Telekommunikationsanbieter, Zahlungsdienstleister oder Betriebssystemanbieter (75).

3.2.3 Individualisierung

Um den Ansprüchen und Anforderungen der Kunden gerecht zu werden, ist eine Zunahme der Individualisierungsmöglichkeiten bei fast allen Fahrzeugherstellern zu beobachten.

Und dieser Trend scheint anzuhalten. Mittlerweile möchte jeder dritte Neuwagenkäufer sein Fahrzeug personalisiert entgegennehmen. Bei der Käufergruppe unter 30 Jahren plant sogar jeder zweite seinen Neuwagen individuell anzupassen (76). Die Möglichkeiten der personalisierten Anpassung scheinen bis ins Unendliche zu reichen. Von der Lackierung des Äußeren, über die Gestaltung des Fahrzeuginnenraums, bis hin zur technischen Anpassungen wie beispielsweise Sportauspuff, Navigationssysteme, Einparkhilfen oder einem alternativen Fahrwerk. Selbst kleinste Details können farblich angepasst oder veredelt werden, denn der Nutzer möchte sich im inneren seines Fahrzeugs wohlfühlen.

Auch der Automobilindustrie kommt dieser Trend zu Gute. Durch diese entstandene „Aufpreis-Bereitschaft“, können Hersteller selbst kleine Gewinnmargen erhöhen.

Der Individualisierungstrend geht jedoch über den Kauf eines Fahrzeugs hinaus. Sogar bei der Kennzeichenwahl ist es wichtig die richtige Kombination zu besitzen (77). Besonders für Sportwagenfahrer hat diese Personalisierung einen besonderen Reiz. So sind beispielsweise Kennzeichen mit der Endung „GT3“ überaus gefragt.

Der Trend „Individualisierung“ wird mit Sicherheit noch weiter ansteigen. Die Möglichkeiten, welche die Digitalisierung mit sich bringt, lässt am Ende wohl keinen Wunsch mehr offen. Software Programme können das innere des Fahrzeugs spontan individuell an den Fahrer anpassen und beispielsweise ein passendes Entertainment Paket vorschlagen. Auch der Fahrstil könnte sich im Fahrzeug wieder spiegeln und somit automatisch gewisse Komponenten zu oder abgeschaltet werden.

3.2.4 Zusammenfassung

Die Weiterentwicklung der Megatrends von morgen ist heute schon deutlich zu beobachten. Es wird jedoch ersichtlich, dass die einzelnen Anforderungen interdependent zu einander stehen. Nur im Miteinander können sinnvolle Schritte eingeleitet werden, um den Kunden weiterhin zufrieden zu stellen. Die Digitalisierung nimmt dabei den größten und wichtigsten Posten ein. Um die Auswirkungen der Urbanisierung und der Individualisierung optimal zu nutzen, vermag es einer stetigen Weiterentwicklung von digitalen Anwendungen. Die Automobilindustrie muss sich

vor allem auf vier Zukunftsfelder konzentrieren: Vernetzung (Connected Cars), autonomes Fahren, flexible Nutzung (Individualisierung) und elektrische Antriebe.

Die Daimler AG verbindet ihre Strategie mit genau diesen Schwerpunkten unter dem Begriff „CASE“ (78). Volkswagen orientiert sich ebenfalls an diesen Schwerpunkten unter der Strategie „Together 2025“. Für dieses Vorhaben arbeitet die Volkswagen AG mit der Stadt Hamburg zusammen, um dort innovative Lösungen zu erarbeiten, die urbane Mobilität umweltschonender, sicherer, verlässlicher und effizienter zu gestalten (79).

3.3 Ressourcenverfügbarkeit

Als dritter Treiber der Elektromobilität, neben den gesetzlichen Rahmenbedingungen und verschiedenen Kundenanforderungen, steht die Ressourcenverfügbarkeit. Dieses Kapitel soll einen Überblick über das aktuelle und prognostizierte Vorkommen an Energierohstoffen sowie deren Verbrauch und Kostenentwicklung verschaffen.

Insbesondere für Fahrzeuge mit konventionellen Verbrennungsantrieben stellt sich die Frage der zukünftigen Verfügbarkeit von mineralölbasierten Kraftstoffen. Die Diskussionen und die Sorge abnehmender oder unzureichender Öl- und Gasversorgung ist nicht neu, sondern spätestens seit den Ölkrisen 1973 und 1979 ein bekanntes Thema.

Die noch verfügbare Menge an Ölreserven wird immer wieder von Fachleuten diskutiert und abgeschätzt. Doch die Frage nach der genauen Dauer der weiteren Verfügbarkeit von Öl und Gas kann nur beantwortet werden, wenn fundierte Aussagen hinsichtlich Förderbarkeit und zukünftigen Bedarfsmengen formuliert werden. Eine Prognose im Jahr 2016 der VGB Power Tech geht davon aus, dass die „statistische Reichweite“⁹ von Erdölreserven und Erdölressourcen zusammen für die nächsten 280 Jahre ausreichen werden (Abb. 15). Ressourcen sind Vorkommen, die zum heutigen Zeitpunkt dokumentiert, aber noch wirtschaftlich nutzbar sind. Dagegen versteht man unter Reserven den Anteil an Ressourcen, der auf Basis heute verfügbarer Techniken wirtschaftlich nutzbar ist.

⁸ Connected, Autonomous, Shared & Service und Electric Drive

⁹ Verhältnis von Reserven zu aktuellem Jahresverbrauch.

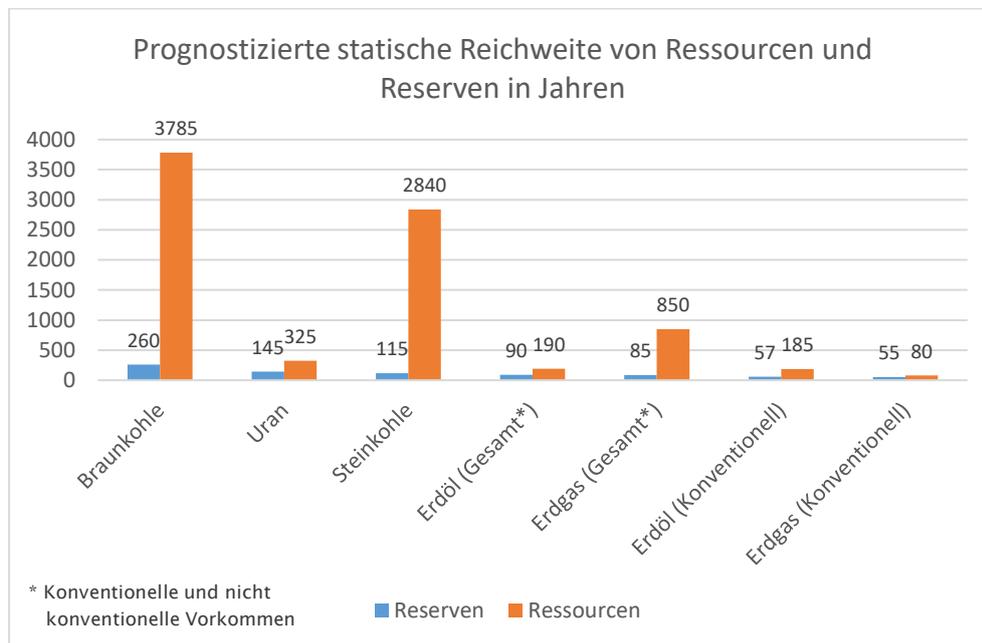


Abbildung 15: Prognostizierte statistische Reichweite von Ressourcen und Reserven – Eigene Darstellung (80)

Die Unsicherheiten der Prognosen liegen somit zum einen an der Ungewissheit der zukünftigen Förderung der Ölressourcen und zum anderen an der Bewertung von unterschiedlichen Formen des Ölvorkommens. Dabei wird beispielsweise in Rohöl, Ölsand und Ölschiefer unterschieden. Verschiedene Ölkonzerne wie Esso oder BP bewerten diese Förderung unterschiedlich, woraus am Ende auch unterschiedliche Prognosen entstehen. Der Abbau von Ölsand und Ölschiefer lohnt sich beispielsweise erst bei höherem Rohölpreis, da die Fördertechnik zur Ölgewinnung komplizierter und kostenintensiver einhergeht. Besonders großes Potential liegt somit in der Forschung und Entwicklung von Abbau- und Fördertechnik zur Ölgewinnung (15, S. 26–29).

Zudem besteht eine Schwierigkeit in der Einschätzung des zukünftigen Ölbedarfs. Besonders die Länder China und Indien mit deren enormem Wirtschaftswachstum lässt Prognosen nur bedingt zu. Auf den gesättigten Märkten wie Europa und den USA lassen sich hingegen deutlich aussagekräftigere Prognosen treffen. Eine Übersicht der Top-10 Länder gemessen am Ölverbrauch bietet Abbildung 16.

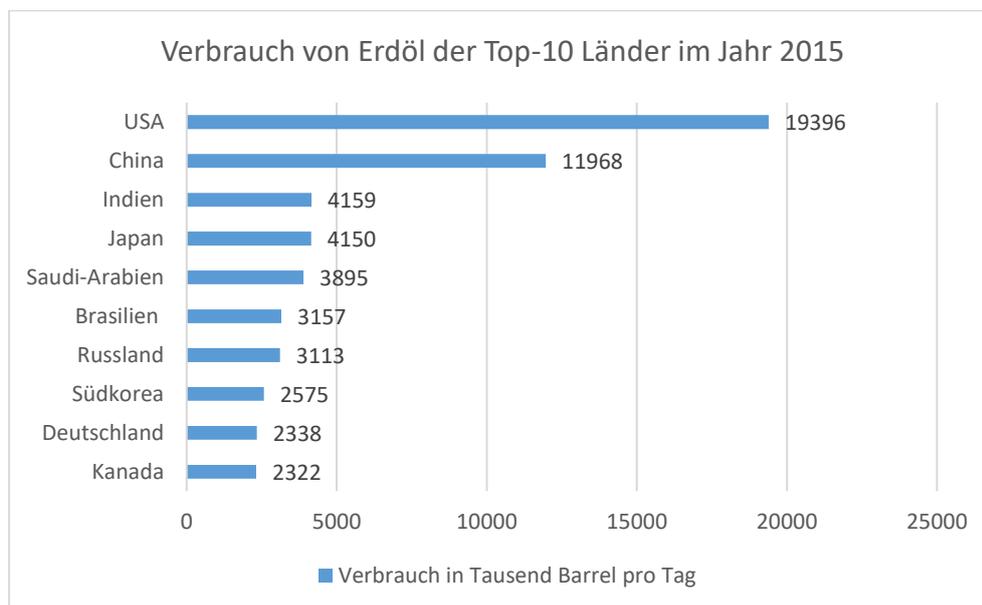


Abbildung 16: Verbrauch von Erdöl der Top-10 Länder im Jahr 2015 – Eigene Darstellung (81)

In Verbindung mit den zukünftigen Entwicklungen in der Automolindustrie ist der Indikator „Peak Oil“ von großer Bedeutung. Nach dieser Theorie, erschaffen vom Geologe M. King Hubbert, wird die weltweite Förderung an Erdöl zunächst weiterhin steigen, bis die Hälfte des Erdöls gefördert wurde und die Fördermenge somit irreversibel zurückgeht. Im Allgemeinen wird Peak Oil auch als das Allzeit-Fördermaximum an Erdöl verstanden. Das bedeutet die maximal pro Jahr jemals geförderte Menge an Rohöl (82).

Mit dem Erreichen des Peak Oil und der damit verbundenen maximalen Fördermenge an Erdöl, ist gleichzeitig mit einem sprunghaften Anstieg der Ölpreise zu rechnen. Ein Ungleichgewicht zwischen Angebot und Nachfrage, sowie die zuvor erwähnten Mehrkosten durch Abbau von Ölsand und Ölschiefer wirken dann preistreibend. Fahrzeuge mit konventionellen Antriebssystemen, die zuvor wirtschaftlich betrachtet einen Vorteil besaßen, könnten dann hinter die alternativen Antriebstechnologien fallen. Durch die Versteuerung der fossilen Kraftstoffe werden die Betriebskosten für Verbrennungsmotoren zusätzlich erhöht und führen zu einem Umbruch in der wirtschaftlichen Betrachtungsweise. Letztendlich hat der Ölpreis einen starken Einfluss auf die Entwicklung und Durchsetzung der alternativen Fahrzeugkonzepte (15, S. 31).

Derzeit befindet sich der Rohölpreis auf einem Abschwung, der seit dem Jahr 2014 anhält. Abbildung 17 zeigt die Preisentwicklung ausgewählter OPEC-Rohöle in den Jahren 2007 bis 2017 in US Dollar je Barrel¹⁰.

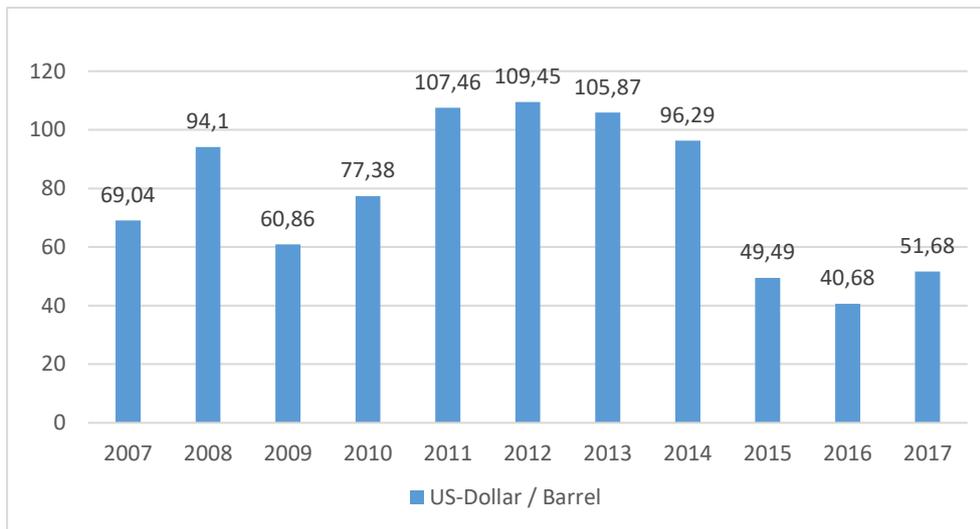


Abbildung 17: Preisentwicklung ausgewählter OPEC-Rohöle in den Jahren 2007 bis 2017 – Eigene Darstellung (83)

Große Unsicherheiten bezüglich der Beschaffung von fossilen Rohstoffen bestehen besonders durch die eingeschränkte Verfügbarkeit und der geologischen Ungleichverteilung. Abbildung 18 zeigt die weltweiten Ölreserven nach Region. Die größten Ölreserven liegen in der Region des Nahen Ostens, gefolgt von Süd- und Mittelamerika. Vor diesem Hintergrund ist es wichtig in alternative Energiekonzepte zu investieren, um somit die Abhängigkeit von großen Ölstaaten und deren Kartelle zu minimieren. Am Ende dient die Abhängigkeit von ölexportierenden Staaten und die Planungsunsicherheit der Ölpreise auch als Treiber für die Entwicklung von alternativen Antriebskonzepten, welche mit einem deutlich geringeren Verbrauch von fossilen Kraftstoffen auskommen.

¹⁰ Ein Barrel entspricht 159 Liter.

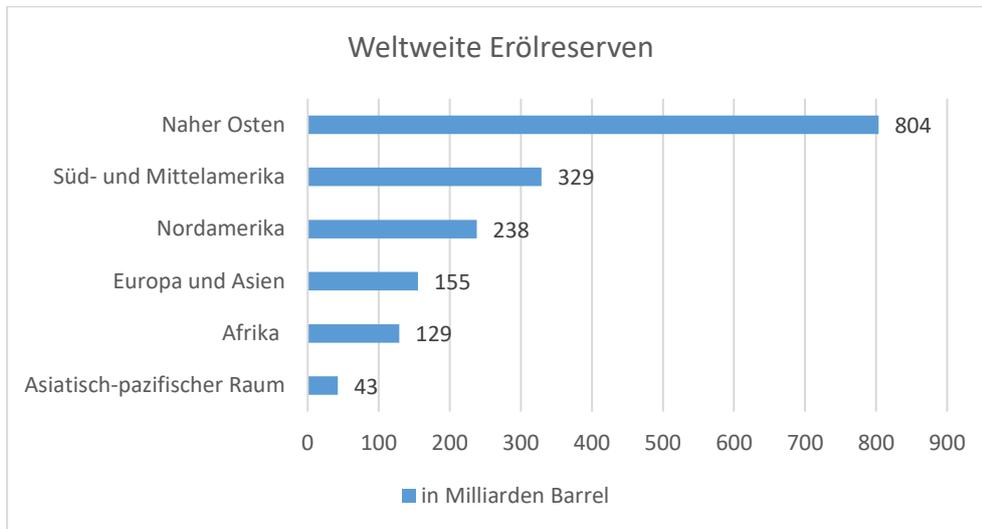


Abbildung 18: Weltweite Erdölreserven nach Region im Jahr 2015 – Eigene Darstellung (84)

4 Grundlagen Kostenanalyse

Im Folgenden werden Grundlagen für die spätere Total Cost of Ownership Analyse beschrieben. Dabei werden die Bestandteile und der Aufbau, sowie grundlegende Formeln zur Berechnung der TCO dargestellt.

4.1 Total Cost of Ownership (TCO)

Mit Hilfe einer TCO-Analyse soll schon vor dem Kauf eines Produktes ermittelt werden, welche Gesamtkosten über den Anschaffungszeitpunkt hinaus, z.B. für Wartung, Reparatur oder Betriebsstoffe, in der Nutzungsphase anfallen werden. Ziel ist es, verschiedene Produkte über eine bestimmte Nutzungsdauer miteinander zu vergleichen. In dieser Arbeit wird die Analyse auf zwei verschiedene Fahrzeugkonzepte (Plug-in-Hybrid und batteriebetriebenes E-Fahrzeug) angewandt. Abbildung 19 zeigt ein TCO-Berechnungsschema, welches als Berechnungsgrundlage dienen soll.

Schon im Jahre 1995 unterschied Lisa Elram zwischen zwei Methoden der TCO. Zum einen in die „monetary-based method“ und zum anderen in die „value-based method“. Dabei ging es ebenfalls um die Frage, unter welchen Umständen der Kunde bereit ist, sich für ein bekanntes Produkt in anderer Form und zu einem höheren Preis zu entscheiden. Die Antwort war auch hier, sobald das Produkt einen höheren Wert (value) bietet (75, S. 70, 4, S. 70).

Wie in Abbildung 19 zu sehen ist, soll im späteren Verlauf dieser Arbeit anhand zweier unterschiedlicher Rechenwege eine gefestigte Aussage hinsichtlich eines potentiellen Gewinns bzw. Verlusts getroffen werden können. Der Nettolistenpreis der Fahrzeuge dient somit als konstanter Ausgangspunkt. Auf der einen Seite wird auf Basis des Nettolistenpreises ein Gesamtkostenbild aus Kundensicht erstellt, welches zur Total Cost of Ownership führt. Auf der anderen Seite, wird eine Kostenanalyse seitens der Produzenten bis hin zum Nettolistenpreis durchgeführt. Durch einsetzen verschiedener Komponenten des elektrischen Antriebsstrangs soll in Folge dessen untersucht werden, in wie weit technische Entwicklungen oder sogenannte „Game Changer“ Einfluss auf Gewinn oder Verlust an einem Fahrzeug nehmen. Aus diesem Grund wird die TCO auf die Jahre 2017, 2020 und 2030 ausgedehnt. Das Ergebnis dieser Kalkulationen soll andeuten in welche Richtung sich die Preise für Komponenten der E-Mobilität bewegen müssen, um gleichwertige Gewinne im Vergleich zu Verbrennerfahrzeugen erzielen zu können. Alternativ besteht die Möglichkeit neue Geschäftsmodelle zu erkennen, die eventuell einen positiven Einfluss auf die Gewinnmarge hervorbringen.

Produzent	Kunde
Alternative Antriebskonzepte: Ladesystem, Batterie, E-Motor, Getriebe, Wechselrichter	Nettolistenpreis
Konventionelle Fahrzeugbauteile	MwSt. (19%)
Montagekosten	Bruttolistenpreis
Herstellkosten	Rabatt
Vertriebs- und Verwaltungskosten	Bruttokaufpreis
Entwicklungskosten/Produktion	Kapitalkosten
Händlermarge	Steuern
Umlagen und Zuschläge	Versicherung
Gewinn / Verlust	Fixkosten
Nettolistenpreis	Kraftstoffkosten (Typ, Verbrauch)
	Netzdienstleistungen
	Kraftstoffkosten
	Reifenkosten
	Reparatur/Inspektion
	Wartungs- und Reparaturkosten
	Maut, Parken, Dienstleistungen
	Sonstige Kosten
	Total Cost of Ownership (TCO)

Abbildung 19: Aufbau einer Total Cost of Ownership Analyse aus Produzenten- und Kundensicht

4.2 Anwendung einer TCO-Kalkulation

Die Total Cost of Ownership Analyse setzt sich aus den Anschaffungskosten und den Betriebskosten eines Produkts, in diesem Fall eines Fahrzeugs, zusammen. Zur Ermittlung dieser Kosten werden verschiedene Berechnungsformeln, in Anlehnung an das Vorlesungsskript „Nachhaltige Mobilität“ (Stand: 01.09.2016) von Herrn Prof. Dr. Ralf Wörner (Hochschule Esslingen), genutzt (85, S. 56–86).

Anschaffungskosten Fahrzeug

Im ersten Schritt werden die Anschaffungskosten eines Fahrzeugs ermittelt. Dabei wird zunächst unterschieden ob ein Fahrzeug durch einen Barkauf, durch eine Finanzierung oder ein Leasinggeschäft angeschafft wird.

Heutzutage wird dabei fast jedes dritte Fahrzeug über Leasingraten finanziert. Allein im vergangenen Jahr 2016 wurden 39,4 % aller neu zugelassenen Straßenfahrzeuge durch Leasingangebote vertrieben. Einen deutlich höheren Anteil nimmt die Sparte der Mittel- und Oberklassewagen ein. Da hier ein Großteil der Nutzer gewerbliche Kunden sind, liegt der Leasinganteil sogar bei 67,8 %. Laut dem Bundesverband

deutscher Leasing-Unternehmen boomt das Fahrzeugleasing und machte 2016 rund 70 % am Volumen des Neuwagengeschäfts aus (86). In dieser Arbeit wird von einem Barkauf des Nettolistenpreises ausgegangen.

Die Fahrzeugkosten bestehen aus dem Nettolistenpreis, einem einmaligen Steueraufschlag bzw. einer Steuervergünstigung, dem Wertverlust über die Nutzungsdauer sowie der Berücksichtigung von Zinseffekten auf vorherige oder spätere Aufwendungen.

Formel 1: Prognose des Wertverlusts (85)

$$P = (1 - f)^n * A_K$$

P = Wertverlust Prognose

n = Nutzungsdauer in Jahren

f = Abschlagswert ($\frac{\text{Prozentsatz}}{100}$)

A_K = Anschaffungswert

Formel 2: Berücksichtigung von Zinseffekten auf vorherige oder spätere Aufwendungen (Bezogen auf den errechneten Wertverlust) (85)

$$Z_E = P * \frac{1}{(1 + r)^n}$$

Z_E = Zinseffekt auf Basis des Wertverlusts

$r = \frac{\text{Zinssatz}}{100}$

Unter Berücksichtigung der Anschaffungskosten und einem möglichen Steueraufschlag bzw. einer Steuervergünstigung, ergibt sich im Zusammenspiel mit den beiden vorangegangenen Formeln eine Gesamtkostenfunktion für das Fahrzeug. Diese bildet den ersten Teil der Formel zur Berechnung der Total Cost of Ownership.

Formel 3: Gesamtfahrzeugkosten (85)

$$K_F = A_K + A_S - P * \frac{1}{(1 + r)^n}$$

K_F = Fahrzeugkosten Gesamt

A_S = Steueraufschlag/Steuervergünstigung

Betriebskosten

Als Betriebskosten werden all jene Kosten bezeichnet, welche dem Fahrzeughalter bzw. dem Fahrer nach dem Kauf, in der Zeit der Nutzung, entstehen. Dazu zählen in

erster Linie Kraftstoffkosten, Kosten für Steuern und Versicherungen sowie Wartungs- und Reparaturkosten. Des Weiteren müssen aber auch Kosten wie Park- oder Mautgebühren und andere positive wie negative Kostenaspekte eingebunden werden. Dabei wird für alle Kosten, parallel zum Wertverlust, ein Zinseffekt berücksichtigt. Dieser weitere Schritt ist notwendig um den Barwert der Betriebskosten im Zeitraum n zu ermitteln.

Formel 4: Betriebskosten mit Zinseffekt

$$K_B = \Sigma [H_E(S_i) + H_{IW}(S_i) + H_{VS} + H_{SK}] * \frac{1}{(1+r)^n}$$

K_B = Betriebskosten Gesamt

H_E = Haltungskosten Energieverbrauch

H_{IW} = Haltungskosten für Instandhaltung und Wartung

H_{VS} = Haltungskosten für Versicherung und Steuer

H_{SK} = Sonstige Haltungskosten

Zusammen bilden die Kostenanteile, Fahrzeugkosten (K_F) und Betriebskosten (K_B) das Ergebnis der Total Cost of Ownership Analyse.

5 Untersuchungsrahmen

In diesem Kapitel soll der Untersuchungsrahmen für die darauffolgende TCO-Analysen beschrieben werden. Anfangs werden Fahrprofile und Fahrzyklen festgelegt, um später die Kraftstoffkosten für den jeweiligen Fahrzeugtyp ermitteln zu können. Im Anschluss werden die verschiedenen Fahrzeuge vorgestellt, um einen Überblick der technischen Spezifikationen zu generieren.

5.1 Fahrprofile

Ein wichtiger Bestandteil ist die Festlegung von Fahrprofilen. Darunter fällt die Annahme der gefahrenen Jahreskilometerleistung sowie die Nutzungsdauer. Um eine aussagekräftige TCO-Kalkulation durchführen zu können, werden in dieser Arbeit zwei unterschiedliche Fahrprofile erstellt. Zum einen wird das Profil eines privaten Nutzers dargestellt und zum anderen das eines Flottenfahrzeugs.

Privater Pkw

Es wird angenommen eine Person, in Stuttgart ansässig, fährt mit dem privaten Pkw eine jährliche Strecke von 14.000 km. Angelehnt ist die Fahrleistung an die durch das KBA ermittelte durchschnittliche Jahresfahrleistung von 14.074 km (87). Des Weiteren wird eine Haltedauer von sechs Jahren angenommen.

Die jährliche Fahrleistung setzt sich aus den folgenden Fahrten in Tabelle 6 zusammen.

Tabelle 5: Fahrprofil privater Pkw

Tägliche Fahrten zur Arbeit (230 Arbeitstage)	50 km* (11.500 km)
2 x jährlich - Urlaubsfahrt	500 km* (1.000 km)
10 x jährlich - längere Überlandfahrt (Ausflüge / Besuch von Verwandten)	150 km* (1.500 km)
Σ	14.000 km

*Eigene Annahmen

Flottenfahrzeug

Angenommen wird ein Flottenfahrzeug, als Teil eines Taxiunternehmens in Stuttgart. Die jährliche Fahrleistung beträgt 60.000 km. Angelehnt an Erfahrungsberichten wird ein Taxi im Durchschnitt vier Jahre gehalten und mit 200.000 km bis 300.000 km abgegeben (88, 89). Aus diesen Informationen wurde folgendes Fahrprofil erstellt. Die Daten beziehen sich auf die jährliche Fahrleistung.

Tabelle 6: Fahrprofil Flottenfahrzeug

Tägliche Fahrten (Arbeitsfahrt und Privat, nicht am Stück, nur Kurzstrecken < 40 km, 230 + 50 Arbeitstage)	200 km* (56.000 km)
2 x jährlich - Urlaubsfahrt	500 km* (1.000 km)
20 x jährlich - längere Überlandfahrt (Ausflüge / Besuch von Verwandten / Längere Geschäftsfahrten)	150 km* (3.000 km)
Σ	60.000 km

*Eigene Annahmen

5.2 Fahrzeugbeschreibung der Vergleichsfahrzeuge

In diesem Kapitel werden die Vergleichsfahrzeuge für die Gegenüberstellung in der Total Cost of Ownership Analyse vorgestellt.

5.2.1 Toyota Prius (PHEV)

Der Toyota Prius vertritt in dieser Arbeit die Sparte der Plug-in-Hybride. Der „Prius“ ist der Vorreiter in der jüngeren Geschichte der Hybrid-Fahrzeuge. So wurde im Jahr 1997 mit dem „Prius I“ die grüne Revolution von Toyota gestartet und das erste Hybridauto der Welt ging in Serie. 2004 und 2009 folgten jeweils die Folgemodelle Prius II und Prius III, bevor Toyota in Produktionsoffensive ging und die erste Hybrid-Familie der Welt entwickelte. Seit 2014 besitzt Toyota sechs Modelle in deren Hybrid-Fahrzeugfamilie (90). Das ausgewählte Fahrzeug entspricht der Grundausrüstung des Herstellers und besitzt keine zusätzliche Sonderausstattung.



Abbildung 20: Toyota Plug-in-Hybrid Modell 2017 (91)

Tabelle 7: Auszug Fahrzeugspezifikation Toyota Prius Plug-in – Eigene Darstellung (91)

Fahrzeugmodell	Toyota Prius Plug-in Comfort
Preis (Brutto in €)	37.550
Motor	Reihenvierzylinder
Hubraum (ccm)	1798
Motorleistung (kW)	72
E-Motor	PSM
E-Motorleistung (kW)	53
Max. Spannung E-Motor (V)	650
Gesamtsystemleistung (kW)	90
Kraftstoffart	Super Bleifrei
Verbrauch, kombiniert (L)	1,0
CO2-Emission, kombiniert (g/km)	22
Schadstoffklasse	EURO 6 W
Tankinhalt (L)	43
Stromverbrauch, kombiniert (kWh/100 km)	7,2
Höchstgeschwindigkeit (km/h)	162
Beschleunigung 0-100 km/h (sec)	11,1
Leergewicht (kg)	1605 - 1625
Hybridbatterie	Lithium-Ionen (95 Zellen)
Batterievolumen (l)	145
Batteriegewicht (kg)	120
Batteriekapazität (kWh)	8,8

Der Toyota Prius Plug-in-Hybrid besitzt einen Reihenvierzylinder mit 72 kW (98 PS) und 1.298 ccm. Darüber hinaus über eine permanentenerregte Synchronmaschine (PSM) mit 68 kW (92 PS), was zu einer Gesamtfahrzeugleistung von 90 kW (122 PS) führt. Das Fahrzeug verfügt über eine Lithium-Ionen-Batterie mit einer Kapazität von 8,8 kWh. Der Prius ist mit der 400 V Technologie ausgerüstet und besitzt die Ladetechnologie „Typ II – Mode III“. Die CO2-Emissionen betragen im kombinierten

Zustand, gemessen im NEFZ, 22 gCO₂/km in der Tank-to-Wheel (TtW) Analyse¹¹ (92, S. 30–31). Der ADAC beziffert diesen Wert im Ecotest unter Well-to-Wheel Bedingungen auf 100 gCO₂/km (93). Der Verbrauch liegt vom Hersteller aus kombiniert bei 1 Liter Benzin und 7,2 kWh Strom für 100 km (92, S. 30–31). Der ADAC beziffert diese Werte mit 2,5 Litern und 5,6 kWh auf 100 km. Die Reichweite im rein elektrische Fahrbetrieb beträgt ca. 50 km.

5.2.2 BMW i3 (BEV)

Als Vertreter der rein batteriebetriebenen Elektrofahrzeuge steht der BMW i3. Auch dieses Fahrzeug hat seine Anfänge schon vor einigen Jahren gemacht. Im Jahr 1969 entwickelte BMW ein rein elektrisches Auto, welches damals zur Begleitung der Marathonläufer eingesetzt wurde. Das Fahrzeug, welches mit einer 250 kg schweren Blei-Batterie ausgestattet war, erzielte eine Reichweite von ca. 60 km. 1991 wurde mit der Studie BMW E1 ein direkter Vorgänger des BMW i3 entwickelt. Das damalige Auto war von Anfang an als Elektrofahrzeug im Kleinwagensegment geplant. Die Eckdaten des direkten Vorläufers für den i3 sind ein 32 kW Elektromotor mit einer Beschleunigung von 6,0 Sekunden auf Tempo 50 und einer Reichweite von bis zu 150 km im Stadtverkehr (94).

Der BMW i3 ist seit November 2013 auf dem Markt und kommt mit einer Batteriekapazität von 94 Amperestunden auf eine maximale Reichweite von 300 km (NEFZ), welche sich im Alltag jedoch auf ca. 200 km beschränkt (95). Hinzu kommen Einschränkungen durch Nutzung der Heizung oder Klimaanlage, was die Reichweite des Fahrzeugs enorm beeinflussen kann.



Abbildung 21: BMW i3 (96 Ah) (96)

¹¹ Im Vergleich zur WtW-Analyse beschränkt sich die TtW-Analyse auf den Betrieb des jeweiligen Fahrzeugs. Dabei liegt der Fokus in der Ermittlung der direkten Emissionen durch Umwandlung des Treibstoffs in Bewegungsenergie (44).

Der BMW i3 besitzt analog zum Toyota Prius eine PSM Maschine, jedoch mit einer Leistung von 125 kW (170 PS). Weitere Gemeinsamkeiten sind die 400 V Technologie sowie die Lithium-Ionen-Batterie, welche im BMW i3 jedoch mit 27,2 kWh Stunden deutlich größer ausfällt. Hinsichtlich der Ladetechnologie unterscheidet sich der BMW i3 zum Prius und besitzt das Schnellladesystem CCS Combo2. Da der BMW ein rein batteriebetriebenes Elektrofahrzeug ist, werden die CO₂-Emissionen laut Hersteller auf 0 gCO₂/km beschrieben. Dies gilt jedoch nur bei einer Tank-to-Wheel Betrachtung (97). Unter dem Ecotest des ADAC schneidet der BMW i3 unter Well-to-Wheel Bedingungen mit 101 gCO₂/km schlechter ab und liegt dabei sogar noch hinter dem Toyota Prius (98). Die Reichweite liegt laut Herstellerangaben bei ca. 300 km. Im Ecotest des ADAC liegt dieser Wert bei 185 km.

Tabelle 8: Auszug Fahrzeugspezifikation BMW i3 – Eigene Darstellung (97)

Fahrzeugmodell	BMW i3 (94Ah)
Preis (Brutto in €)	36.800
E-Motor	PSM
E-Motorleistung (kW)	125
Gesamtsystemleistung (kW)	125
CO ₂ -Emission, kombiniert (g/km)	0
Stromverbrauch, kombiniert (kWh/100km)	13,1
Höchstgeschwindigkeit (km/h)	150
Beschleunigung 0-100 km/h (sec)	7,3
Leergewicht (kg)	1320
Batterie	Lithium-Ionen
Batterievolumen (l)	Keine Angaben
Batteriegewicht (Kg)	Keine Angaben
Batteriekapazität (kWh)	27,2

5.2.3 Opel Ampera-e



Abbildung 22: Opel Ampera-e (99)

Der Opel Ampera-e soll als zusätzliches Vergleichsfahrzeug dienen. Vor allem in puncto Verbrauch sollen somit weitere Vergleichszahlen ermittelt werden. Des Weiteren wird der Untersuchungsrahmen, hinsichtlich Kostenkomponenten des elektrischen Antriebsstrangs, vergrößert.

Das Fahrzeug ist das direkte Pendant zum US-Amerikanischen Chevrolet Bolt. Der Ampera soll ab Herbst für 39.330 € in Deutschland verkauft werden (99). Besonders beachtlich ist die enorme Reichweite, die Opel mit 520 km im NEFZ angibt. Des Weiteren besitzt der Ampera-e ein mehr als doppelt so großes Batteriesystem mit einer Kapazität von 60 kWh (100). Im Ecotest des ADAC schneidet das Fahrzeug mit einem Verbrauchswert von 19,7 kWh/100 km mit ca. 5 kWh Stunden schlechter ab, als die vorgegebenen Werksangaben von Opel mit 14,5 kWh/100 km. Die CO₂-Emissionen liegen laut Hersteller ebenfalls bei 0 gCO₂/km. In einer Well-to-Wheel Betrachtung des ADAC liegt dieser Wert bei 114 gCO₂/km (101). Die Ladetechnologie entspricht der des BMW i3, ein Schnellladesystem CCS Combo 2. Ausgeliefert wird der Ampera-e jedoch mit einem 2,3 kW Ladekabel. Weitere Fahrzeugspezifikationen können der Tabelle 9 entnommen werden.

*Tabelle 9: Auszug Fahrzeugspezifikationen Opel Ampera-e – Eigene Darstellung
(102)*

Fahrzeugmodell	Opel Ampera-e
Preis (Brutto in €)	39.330
E-Motor	PSM
E-Motorleistung (kW)	150
Gesamtsystemleistung (kW)	150
CO2-Emission, kombiniert (g/km)	0
Stromverbrauch, kombiniert (kWh/100 km)	14,5
Höchstgeschwindigkeit (km/h)	150
Beschleunigung 0-100 km/h (sec)	7,3
Leergewicht (kg)	1691
Batterie	Lithium-Ionen (288 Zellen)
Batterievolumen (l)	Keine Angaben
Batteriegewicht (Kg)	Keine Angaben
Batteriekapazität (kWh)	60

6 Kostenanalyse der Vergleichsfahrzeuge

Um eine umfangreiche Kostenanalyse durchzuführen, bedarf es einer umfassenden Recherche der Fahrzeugkosten. Darunter fallen die Anschaffungs- und Betriebskosten. Zu Anfang werden grundlegende Kostenkomponenten des Fahrzeugs ermittelt und beurteilt. Dabei stehen besonders Komponenten des elektrischen Antriebsstrangs im Vordergrund. Die Kostenkomponenten werden vorerst mit Hilfe eines Referenzfahrzeugs abgebildet, bevor diese auf die beiden Fahrzeugkonzepte angewandt werden. Danach werden die Betriebskosten erläutert und dem jeweiligen Fahrzeug im ausgewählten Anschaffungsjahr zugeordnet. Darauf aufbauend wird eine Total Cost of Ownership sowie Sensitivitätsanalyse durchgeführt.

Alle Berechnungen der Total Cost of Ownership Analyse beruhen auf einer selbstständig erstellten Excel Datei, die als elektronisch gespeichertes Hilfsmittel hinterlegt ist. Des Weiteren ist anzumerken, dass zur Erstellung der TCO stets die Verbrauchswerte des ADAC Ecotest genutzt wurden, um möglichst realistische Ergebnisse zu erzielen.

6.1 Darstellung der Fahrzeugkosten

Die Fahrzeugkosten werden in zwei Kategorien eingeteilt. Jene Komponenten, die speziell dem (E-) Antriebsstrang dienen und zum anderen solche, die als Basisfahrzeug bezeichnet werden. Des Weiteren kommen Kosten für Vertrieb und Verwaltung, Entwicklungskosten und eine Händlermarge hinzu. Tabelle 8 zeigt die Zusammensetzung der Kosten für den elektrischen Antriebsstrang anhand eines Referenzfahrzeuges, sowohl für ein Plug-in-Fahrzeug, als auch für ein rein batteriebetriebenes E-Fahrzeug. Die Batteriekosten in den folgenden Übersichten beziehen sich auf Systempreise. Um die Kosten für Systempreise anzurechnen, wird mit einem Aufschlag von 30 % des Zellpreises kalkuliert. Alle Angaben werden mit Hilfe von Recherchearbeit und dem Einfluss von Expertenmeinungen geschätzt und angenommen.

Tabelle 10: Kostenübersicht der Komponenten des (E-) Antriebsstrangs im Jahr 2017 (Eigene Annahmen)

Bauteil	Fahrzeug		Kosten
Batterie (Lithium-Ionen)	PHEV / BEV	€ / kWh	325 €
E-Maschine	PHEV / BEV	Basis: 80 kW	400 € Basis + 5 € je kW
Wechselrichter	PHEV / BEV	Pauschal	400 €
DC-Kabel	PHEV	Pauschal	150 €
	BEV	Pauschal	200 €
Ladesystem	PHEV / BEV	7,2 kW	300 €
		43 kW	700 €
		150 kW	1.000 €
Getriebe	PHEV		1.500 €
	BEV	Einstufig	400 €
Verbrennungsmotor	PHEV	Pauschal	2.500 €
Zusatzteile (Tank, Leitungen, Abgasanlage)	PHEV	Pauschal	1.500 €

Im Vergleichsjahr 2020 ändern sich diese Werte teilweise. Die Kosten der Lithium-Ionen-Batterie kann durch bessere Produktionsverfahren gesenkt werden, wohingegen die Preise des Verbrennungsmotors und dessen Zusatzteile steigen. Dieser Anstieg resultiert aus einer innovativen Wasserkühlung des Motors und einer Aufrüstung der Abgasanlage durch neue Katalysatortechnik (z.B. SCR-Katalysatoren in Dieselfahrzeugen). Das Getriebe für EV-Fahrzeuge wird voraussichtlich durch den Einsatz einer zweistufigen Bauweise um 100 € teurer. Die Änderungen der Werte werden in Tabelle 11 grau hinterlegt.

Tabelle 11: Kostenübersicht der Komponenten des (E-) Antriebsstrangs im Jahr 2020 (Eigene Annahmen)

Bauteil	Fahrzeug		Kosten
Batterie (Lithium-Ionen)	PHEV / BEV	€/ kWh	260 €
E-Maschine	PHEV / BEV	Basis: 80 kW	400 € Basis + 5 € je kW
Wechselrichter	PHEV / BEV	Pauschal	400 €
DC-Kabel	PHEV	Pauschal	150 €
	BEV	Pauschal	200 €
Ladesystem	PHEV / BEV	7,2 kW	300 €
		43 kW	700 €
		Bis 150 kW	1.000 €
Getriebe	PHEV		1.500 €
	BEV	Zweistufig	500 €
Verbrennungsmotor	PHEV	Pauschal	2.750 €
Zusatzteile (Tank, Leitungen, Abgasanlage)	PHEV	Pauschal	2.350 €

Um den Berechnungszeitraum zu komplementieren werden die Kosten für das Jahr 2030 geschätzt. Die Schätzung erfolgt durch Annahme eines Kostenanstiegs entsprechend einer 3-prozentigen Inflationsrate. Gleichzeitig sinken die Kosten der Lithium-Ionen-Batterie jedoch nochmals um 50 % auf 130 €/kWh. Gründe hierfür sind weitere Produktionsoptimierungen, Minimierung der Qualitätsschwankungen in der Zellproduktion und Optimierung der Systemtechnik (23, S. 305).

Weitere Kostenkomponenten zur Berechnung der Fahrzeugkosten stehen unter dem Kostenpunkt „Basisfahrzeug“. Dazu gehören konventionelle Bauteile und Montagekosten. Außerdem werden im Falle des BMW i3 Zusatzkosten für Carbon-Rohbauteile und dem Aufbau einer Solitärplattform angerechnet (Tab. 10). Die Werte für das Jahr 2030 werden wiederum durch einen drei prozentigen inflationsbedingten Anstieg bestimmt.

Tabelle 12: Kosten Basisfahrzeug

Bauteile	Anteil
Konventionelle Fahrzeugbauteile*	Pauschal 7.000 €
Carbon Karosserie Rohbauteile* (BMW i3)	Pauschal 2.000 €
Montagekosten*	10 % des NLP ¹²
Solitärplattform* (BMW i3)	500 Mio. € / 140.000 Einheiten = 3.500 €

*Eigene Annahmen

Um die Darstellung der Fahrzeugkosten abzuschließen, werden die Vertriebs- und Verwaltungskosten, Entwicklungskosten sowie die Händlermarge im Kostenpunkt „Umlagen und Zuschläge“ festgehalten (Tab. 11). Auch hier wird im Jahr 2030 eine Kostensteigerung von drei Prozent angenommen.

Tabelle 13: Kosten für Umlagen und Zuschläge

Vertriebs - und Verwaltungskosten*	15 % des NLP
Händlermarge*	25 % des NLP
Entwicklungskosten ¹³	PHEV: 800 € EV: 2.900 €

*Eigene Annahmen

6.2 Darstellung der Anschaffungskosten

Die Anschaffungskosten eines Fahrzeugs setzen sich aus dem Nettolistenpreis und der dazugehörigen Mehrwertsteuer zusammen. Daraus folgt der Bruttolistenpreis. Hinzu kommen Wertverlust, Zinseffekte und Subventionen durch den Staat und Hersteller. Zur Berechnung der gesamten Anschaffungskosten eines Fahrzeugs wird die Formel 3 „Gesamtfahrzeugkosten“ genutzt. In Tabelle 12 ist der Verlauf dieser Berechnungen zu sehen. Auch hier wird ab dem Jahr 2030 mit einem drei prozentigen Anstieg des Nettolistenpreises gerechnet.

¹² Nettolistenpreis

¹³ Nach Schema in Anlage 1 (A1)

Tabelle 14: Anschaffungskosten

Nettolistenpreis	
+ Mehrwertsteuer	Länderspezifisch DE: 19 %
= Bruttolistenpreis	
Wertverlust	konventionell: 18 % (85) rein elektrisch: 15 % (85)
Zinseffekte	1,5 %*
Subventionen	Länderspezifisch
= Anschaffungskosten	

*Eigene Annahmen

6.3 Darstellung der Betriebskosten

Die Betriebskosten werden dem jeweiligen Fahrzeug bzw. dem jeweiligen Fahrprofil angepasst. Sie werden in vier unterschiedliche Kostensegmente eingeteilt. Zu Anfang werden die Fixkosten, welche sich aus Kfz-Steuer und Versicherung zusammensetzen, ermittelt. Weiter werden die Kraftstoffkosten durch den Strompreis (€/kWh) und Kraftstoffpreis (€/Liter) auf den Verbrauch und die Fahrleistung der Fahrzeuge übertragen. Wartungs- und Reparaturkosten bilden ein weiteres Kostensegment. Hierbei sind Inspektion und Wartung, Reifenkosten inklusive der Montage und Reparaturen enthalten. Das letzte Kostensegment bilden die „sonstigen Kosten“, in denen Maut- und Parkgebühren, Strafzettel, Kosten für die Waschanlage und weitere Dienstleistungen für Fahrzeuge beachtet werden. In dieser Arbeit wird für die Jahre 2017 und 2020 ein Pauschalbetrag von 200 €/Jahr angenommen.

Für das batteriebetriebene Elektrofahrzeug wird zusätzlich der Kostenpunkt „Ladeinfrastruktur“ einmalig eingeplant. Dabei wird mit einem Betrag von 904,40 € kalkuliert, was dem Preis einer Wallbox (bis zu 22 kW/3-phasig, 230 V, 32 A, T2) von BMW entspricht (103). Tabelle 15 zeigt eine Übersicht der Betriebskosten im Jahr 2017.

Tabelle 15: Kostensegmente der Betriebskosten für das Jahr 2017

Kostensegmente	Aufteilung	Kosten
Fixkosten	Steuern	Individuell
	Versicherung	Individuell
Kraftstoffkosten	Kraftstoffpreis (€/Liter)	1,38 € (104)
	Strompreis (€/kWh)	0,29 € (105)
Wartungs- und Reparaturkosten	Reifenkosten inkl. Montage	Individuell
	Reparaturen	Individuell
	Inspektion und Wartung	Individuell
	Maut- und Parkgebühren, Straßzettel, Dienstleistungen	200 € p.a. Pauschal

Für das Jahr 2020 werden in dieser Arbeit keine außerordentlichen Kostensteigerungen angenommen. Gesonderte Preisveränderungen der Kraftstoffkosten werden durch Einsatz einer Sensitivitätsanalyse berücksichtigt. Vorerst wird jedoch davon ausgegangen, dass sich z.B. die Stromkosten durch Rückgang der EEG-Umlage und Zunahme von Netzausbaukosten ausgleichen werden. Im Jahr 2030 wird wie schon zuvor mit einem drei prozentigen Anstieg kalkuliert. Zusätzlich werden die „sonstige Kosten“ auf 8 € je Arbeitstag erhöht (220 Arbeitstage = 1760 € p.a.). Grund dafür sind voraussichtliche Einfuhrsperren und Mautgebühren, ähnlich der „London Congestion Charge“. Alle spezifischen und individuellen Kostenanteile beruhen beispielsweise auf eingeholten Angeboten bei Versicherungsgesellschaften oder auf Erfahrungswerten des ADAC hinsichtlich Wartungs- und Reparaturkosten.

6.4 Berechnung und Ergebnisse der Total Cost of Ownership Analyse

In diesem Kapitel werden Ergebnisse der Total Cost of Ownership Analyse präsentiert. Dabei wird zwischen zwei verschiedenen Auswertungen differenziert. Zu Anfang werden Ergebnisse hinsichtlich Gesamtkosten aus Kundensicht grafisch dargestellt. Der Fokus liegt dabei in der Entwicklung dieser Kosten bis ins Jahr 2030.

Im Anschluss folgen Auswertungen aus Sicht der Produzenten. Dabei soll durch die Darstellung bestimmter Kostenkomponenten und deren Kostenverlauf aufgezeigt werden, in welchem Bereich die größten Optimierungsmöglichkeiten liegen.

6.4.1 Total Cost of Ownership aus Kundensicht

Folgende Auswertungen beziehen sich auf die TCO-Analyse aus Kundensicht. Die Abbildungen 23 und 24 zeigen die Ergebnisse aus der gesamten Haltedauer der Fahrzeuge. Zum einen, im Fall des Privatfahrzeugs, besteht eine Haltedauer von sechs Jahren und eine Fahrleistung von 14.000 km/Jahr und zum anderen, im Fall des gewerblichen Flottenfahrzeugs, eine Haltedauer von vier Jahren und eine Fahrleistung von 60.000 km/Jahr. Dabei ist zu erkennen, dass sich der Kostenverlauf zwischen dem Plug-in Fahrzeug (Toyota Prius) und den reinen Elektrofahrzeugen (BMW i3, Opel Ampera-e) weitgehend ähnelt. Besondere Ähnlichkeit besteht in den Vergleichsjahren 2017 und 2020. In diesen Jahren schneidet der rein batteriebetriebene Opel Ampera, vor allem durch den größten Anschaffungspreis, mit der höchsten TCO ab. Erst mit dem Jahr 2030 und einem bemerkbaren Anstieg der Total Cost of Ownership des Toyota Prius Plug-in, überholt dieser die Vergleichsfahrzeuge.

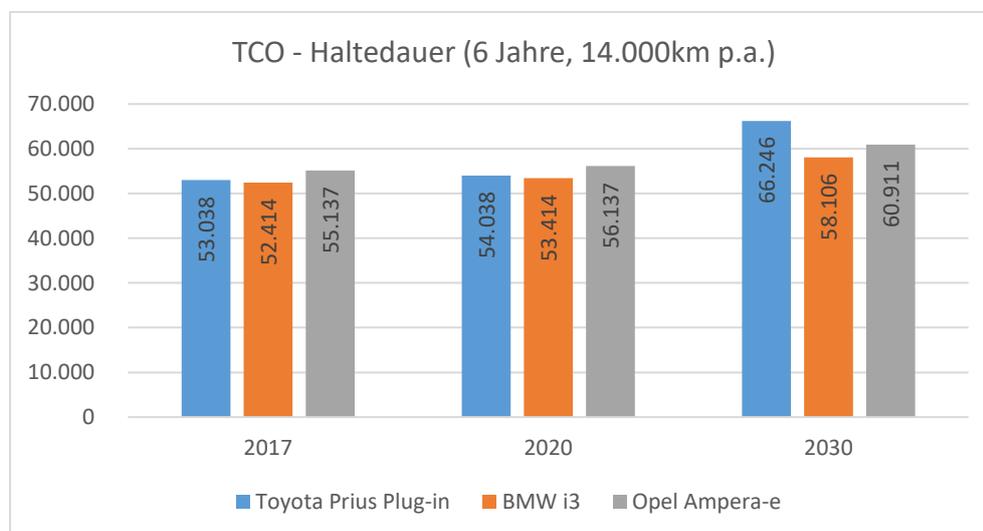


Abbildung 23: TCO-Haltedauer (Privatfahrzeug)

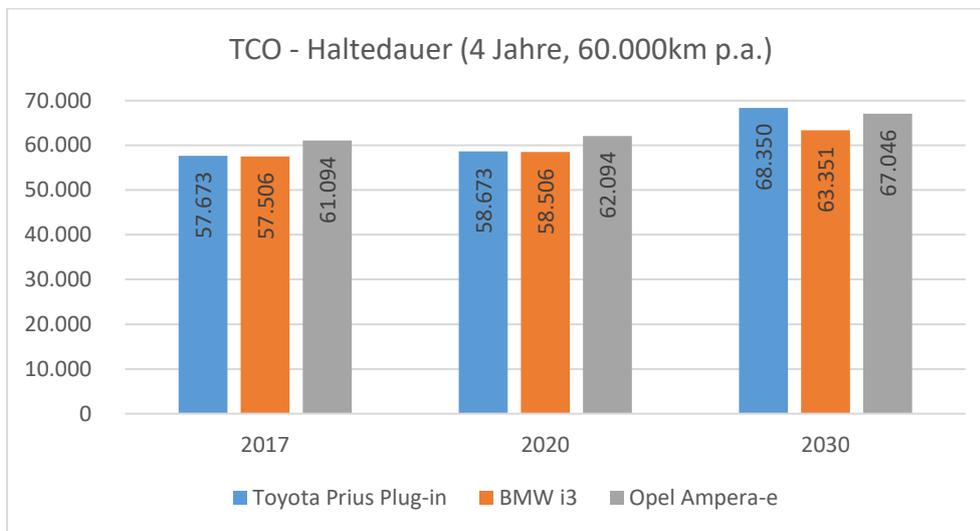


Abbildung 24: TCO-Haltedauer (Flottenfahrzeug)

Die Ergebnisse in den Jahren 2017 und 2020 resultieren hauptsächlich aus der Kostenverteilung der Vergleichsfahrzeuge. So besitzt der Toyota Prius z.B. einen höheren Anschaffungspreis als der BMW i3, was durch geringe Subventionen zusätzlich verstärkt wird. Andererseits fallen die Wartungs- und Reparaturkosten mit 3240,00 €/5136,00 € deutlich geringer aus, als beim BMW i3 (4102,00 €/6432,00 €). Beide Zahlenwerte werden mit Hilfe von Angaben des ADAC berechnet (106, 93). Die Versicherungskosten werden durch Anfrage verschiedener Tarifangebote bei der WGV-Versicherung AG bestimmt (107-110). Dieses Kostenbild wird für den Opel Ampera parallel zum BMW i3 erstellt.

Im Jahr 2030 ist ein Kostenanstieg deutlich zu erkennen. Gründe dafür sind die schon zuvor erwähnten inflationsbedingten Anstiege von drei Prozent und der Wegfall von Subventionen. Darüber hinaus führt der anwachsende Kostenpunkt „Sonstige Kosten“, der beispielsweise Park- und Mautgebühren beinhaltet, zu einem Positionswechsel zwischen Toyota Prius und Opel Ampera. Im Gegensatz zur Ausgangssituation 2017 (200 € Pauschalbetrag) wird im Jahr 2030 die Annahme getroffen, dass sich die Kosten für City-Maut oder Parkgebühren enorm verändern werden (Kap. 6.3 Darstellung der Betriebskosten). Diese Entwicklung und die zusätzlichen Differenzen des Anschaffungspreises und der Verbrauchswerte führen zu dem großen Anstieg der Gesamtkosten des Toyota Prius. Dieser Unterschied spiegelt sich in den TCO-Ergebnissen pro gefahrenen Kilometer wider.

Die Abbildungen 25 und 26 zeigen die Abweichung zwischen Privatfahrzeugen und Flottenfahrzeugen hinsichtlich der Total Cost of Ownership je Kilometer. Liegt die Differenz von Hybridfahrzeug zu Elektrofahrzeug vorerst bei 0,06 € bis 0,10 € pro Kilometer, erübrigt sich diese im Laufe der gefahrenen Kilometer. Mit steigender

Gesamtfahrleistung nähern sich die Zahlenwerte einander an. Die Erklärung dafür sind die steigenden Verbrauchskosten des Opel Ampera-e und BMW i3. Die Annäherung der TCO-Werte in Abbildung 26 zeigt die Sensitivität der Verbrauchswerte.

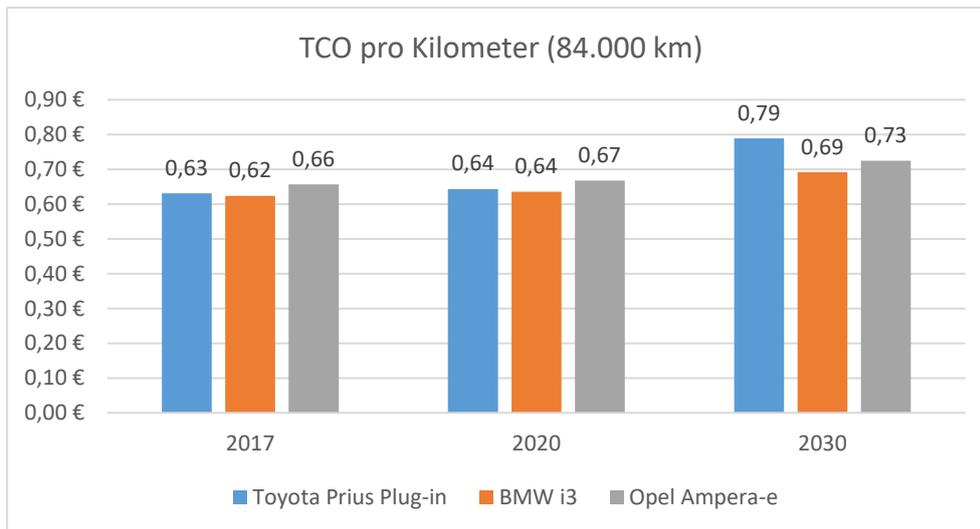


Abbildung 25: TCO pro Kilometer (Privatfahrzeug)

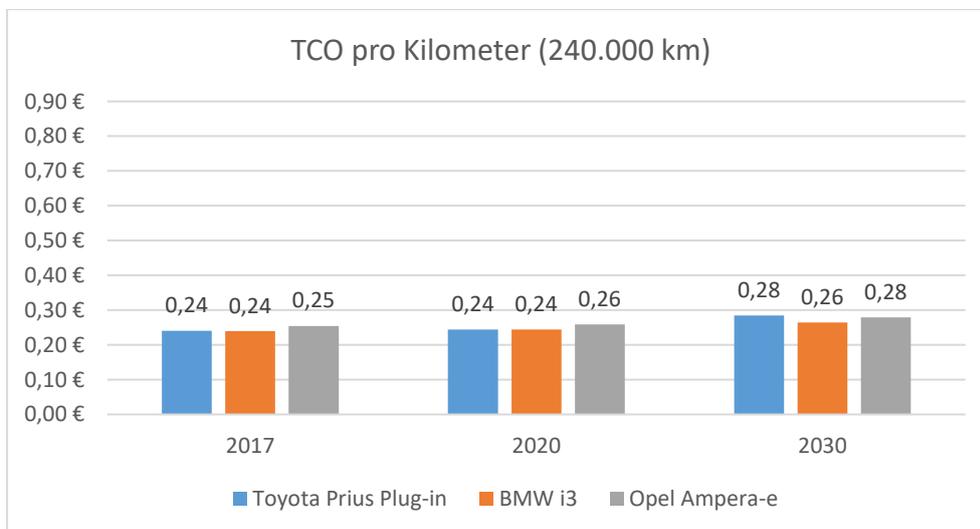


Abbildung 26: TCO pro Kilometer (Flottenfahrzeug)

Um das Bild der TCO-Analyse aus Kundensicht zu vervollständigen, werden in Abbildung 27 und 28 Auswertungen hinsichtlich der Gesamthaltedauer, in den Märkten USA und China dargestellt. Dabei werden die Subventionen länderspezifisch angepasst. Alle weiteren Einflussgrößen werden unverändert übernommen, wohlwissend das sich auch hier größere und kleinere Unterschiede, z.B. in der Kfz-Versicherung oder den Kraftstoffkosten ergeben werden. Aus diesen Gründen werden die Untersuchungen auf Fahrzeuge im Privatgebrauch begrenzt. Es werden durchschnittliche Subventionen von 7.500 € (USA) und 7.300 € (China) angenommen.

Im Jahr 2030 entfallen diese Subventionen für Fahrzeuge mit elektrischem Antriebsstrang und die Kosten der Total Cost of Ownership steigen auch aufgrund dessen um ca. 37 % an. In Deutschland beträgt der Kostenanstieg bis zu 22 %. Unter Berücksichtigung der maximalen Förderung durch lokale Subventionen (USA: 10.900 €, China: 12.000 €) entsteht eine noch größere Kluft der Gesamtkosten zum Jahr 2030.

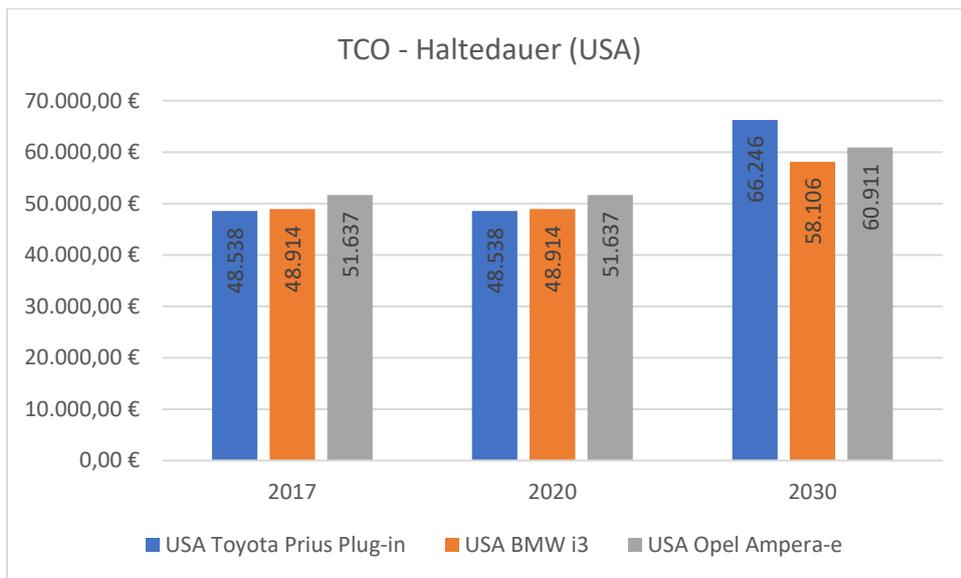


Abbildung 27: TCO - Haltedauer Privatfahrzeug (USA)

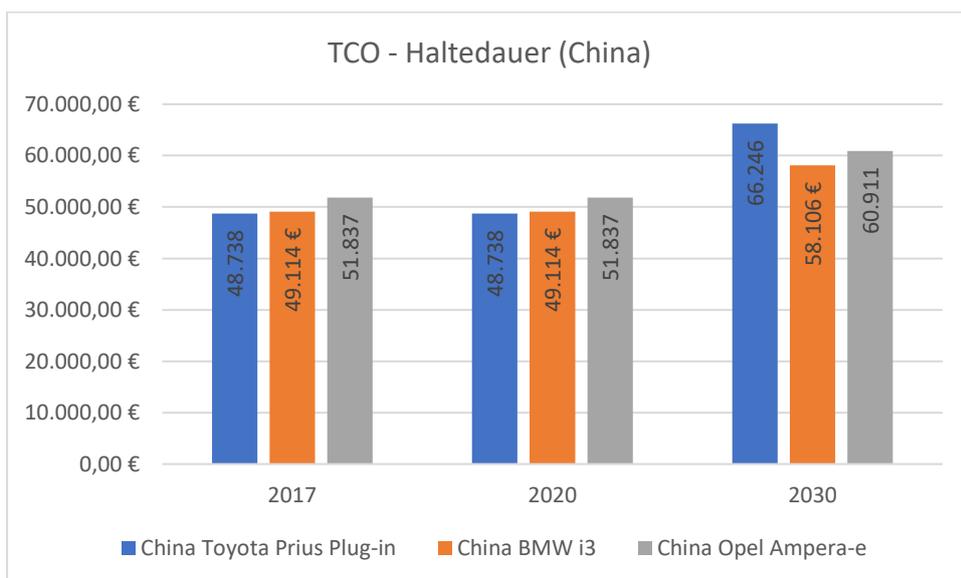


Abbildung 28: TCO - Haltedauer Privatfahrzeug (China)

6.4.2 Total Cost of Ownership aus Produzentensicht

Die weiteren Total Cost of Ownership Auswertungen beziehen sich auf die Ermittlung eines Gewinnes oder Verlustes aus Produzentensicht. In Abbildung 30 wird zunächst ein Überblick der Gewinn- und Verlustverteilung gegeben. Deutlich zu erkennen sind die großen Unterschiede zwischen dem Hybrid- und Elektrofahrzeug. Die Verluste resultieren aus der Differenz zwischen errechneten Gesamtherstellungskosten (GK) und dem Nettolistenpreis laut Hersteller (Abb. 29).

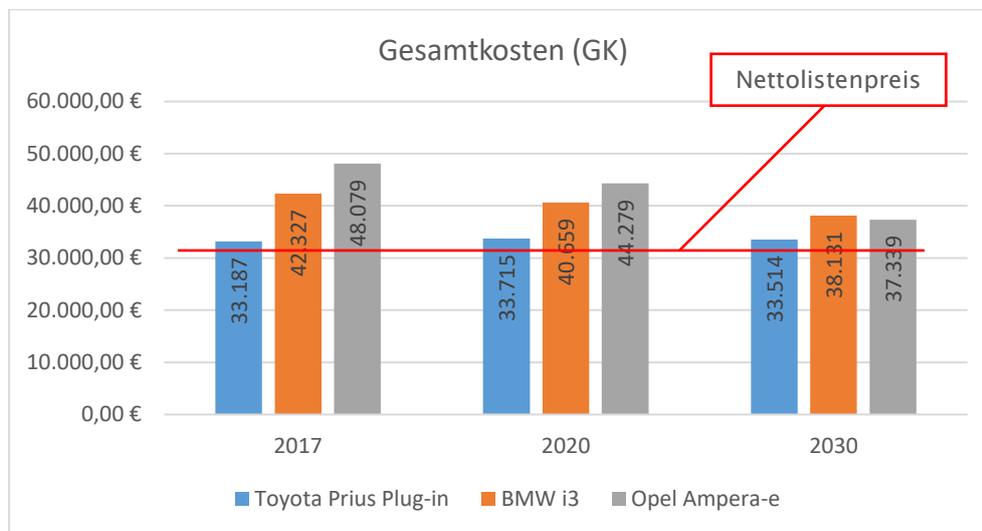


Abbildung 29: Entwicklung der gesamten Herstellungskosten

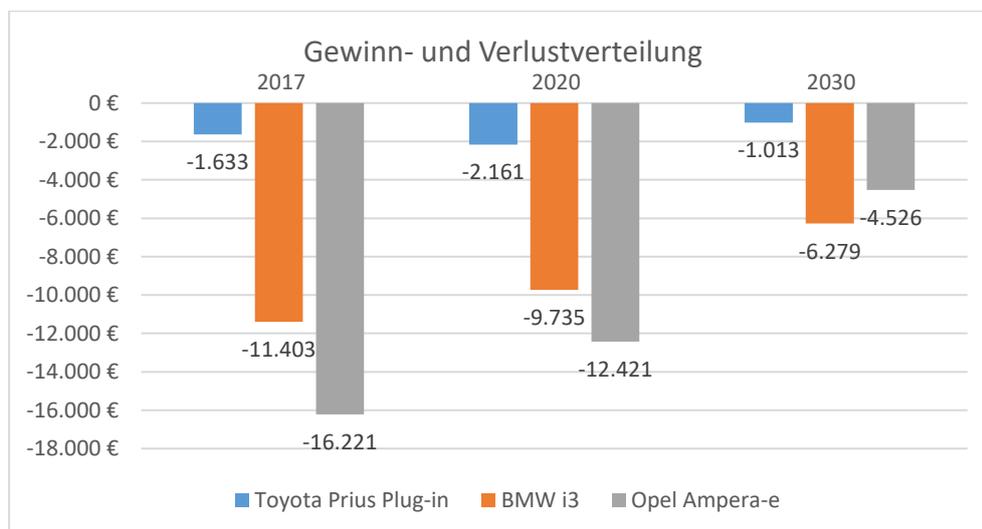


Abbildung 30: Gewinn- und Verlustverteilung für Produzenten

Dieser Unterschied zwischen den Resultaten ist das Ergebnis verschiedener Kostenpunkte, die für den Toyota Prius erst gar nicht bestehen oder um ein vielfaches geringer sind.

Der BMW i3 generiert deshalb so einen überaus großen Verlust, da vor allem Kosten für die Solitärplattform (ca. 3.500 €), Carbon-Zusatzteile im Rohbau (ca. 2.000 €) und höhere Entwicklungskosten (2.900 €) anfallen. Der Verlust des Opel Ampera ist durch die überaus hohen Batteriekosten (Batteriesystem ca. doppelt so groß im Vergleich zum BMW i3) zu erklären. Im Jahr 2030 ändert sich die Rangfolge durch abnehmende Batteriekosten und dem um 2.500 € höheren Verkaufspreis des Ampera-e.

Die Abbildungen 31, 32 und 33 zeigen die jeweiligen Kostenverteilungen im Jahr 2030. Dabei ist ersichtlich, dass besonders Kosten für Umlagen und Zuschläge sowie die Kosten für das Basisfahrzeug ins Gewicht fallen. In diesen Kostenpunkten ist der BMW i3 ca. 7.500 € teurer als der Toyota Prius. Der Grund für die höheren Kosten des Antriebsstrangs, auf Seiten des Plug-in-Fahrzeugs, liegt im Verbrennungsmotor und dessen Zubehör wie Abgastechnik, Tank und Leitungen. Dennoch kann die Vergünstigung des Antriebsstrangs die restlichen Kostenpunkte des BMW nicht auffangen (Abb. 32).

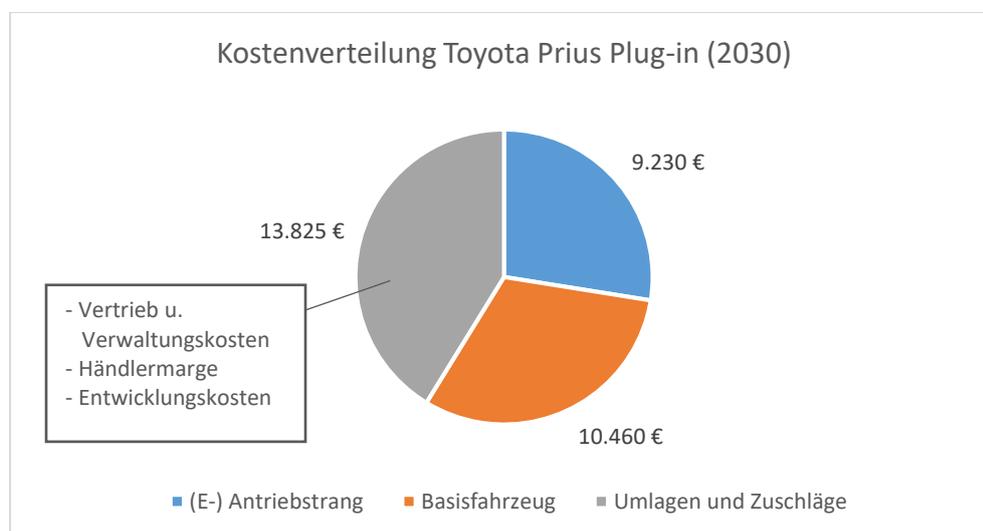


Abbildung 31: Kostenverteilung Toyota Prius Plug-in im Jahr 2030

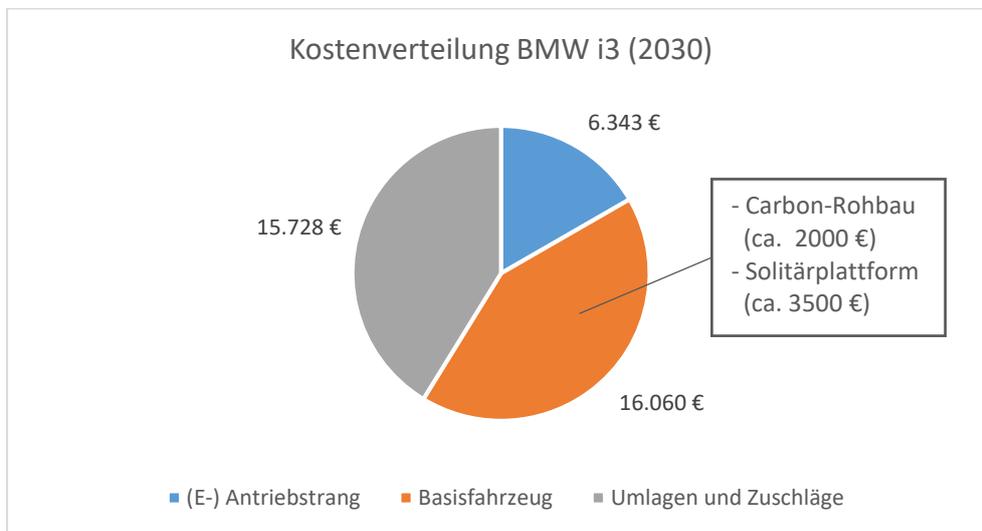


Abbildung 32: Kostenverteilung BMW i3 im Jahr 2030

Die Kostenstruktur des Opel Ampera-e ist im Tortendiagramm der Abbildung 33 festgehalten. Diese Struktur weicht von der des BMW i3 teilweise ab. Grund dafür sind die Mehrkosten der Batterie, welche 60 kWh fasst und somit einen Zuwachs der Antriebstrangkosten verursacht. Im Gegenzug verringern sich die Kosten für das Basisfahrzeug. Da das Fahrzeug auf Basis des Chevrolet Bolt entwickelt wurde, bestehen keine Kosten für eine Solitärplattform. Des Weiteren werden keine Carbon-Rohbauteile verbaut, was eine Einsparung von ca. 2000 € nach sich zieht. Die Kosten für Umlagen und Zuschläge sind fast identisch und weichen aus Gründen der hohen Entwicklungskosten von denen des Toyota Prius ab.

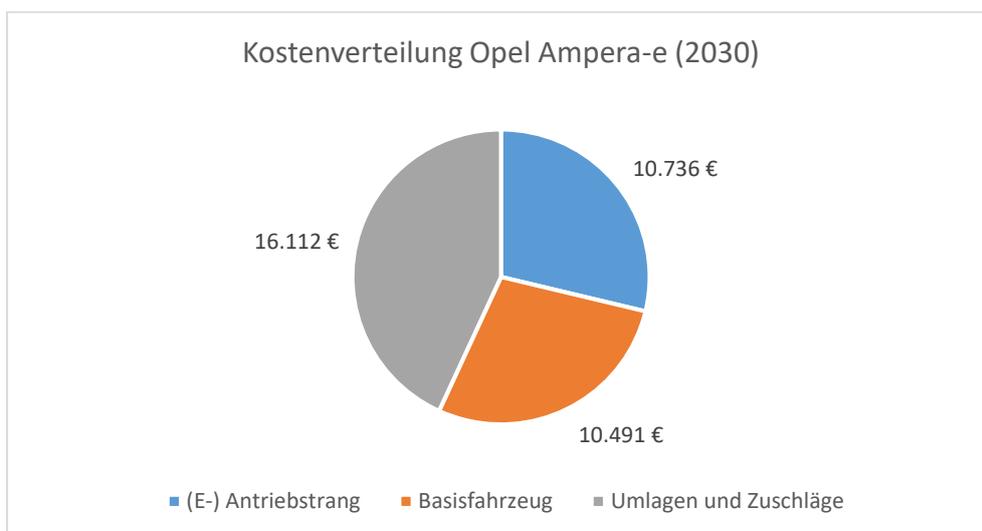


Abbildung 33: Kostenverteilung Ampera-e im Jahr 2030

Ein weiterer Fokus liegt auf den Kosten des Antriebssystems der Vergleichsfahrzeuge. Hierbei verdeutlicht Abbildung 34 die jeweiligen Kosten für den Antriebsstrang, in Abhängigkeit der Fahrzeugtypen und Untersuchungszeiträumen.

Die Entwicklung des Kostenverlaufs für den Antriebsstrang wird durch einzelne Komponenten wie z.B. der Batterie oder der Leistungselektronik beeinflusst. Auffällig ist eine generelle Abnahme der Kosten. Einzig die Kosten für den Antriebsstrang des Toyota Prius nehmen zwischenzeitlich zu. Auslöser ist ein voraussichtlicher Kostenanstieg der konventionellen Antriebskomponenten. Dabei wird davon ausgegangen, dass die Kosten des Verbrennungsmotors durch eine neuartige Wasserkühlung um ca. 250 € ansteigen. Es wird die Annahme getroffen, dass die Kosten für Abgasnachbehandlungen, z.B. durch den Einbau von SCR-Katalysator-Technologie um weitere 850 € ansteigt, siehe Kapitel „6.1 Darstellung der Fahrzeugkosten“. Die Differenz der Jahre 2017 und 2020 ergibt sich jedoch auch aus der Kostenentwicklung der Batterie, welche sich auf Systemebene um 65 €/kWh reduziert.

Das Elektrofahrzeug BMW i3 ist davon ebenso stark betroffen wie der Opel Ampera. Die abnehmenden Batteriekosten beeinflussen die Gesamtkosten des Antriebsstrangs. In Abbildung 35 ist eine prozentuale Verteilung der Kostenkomponenten, bezogen auf die Kosten in Abbildung 34, dargestellt.

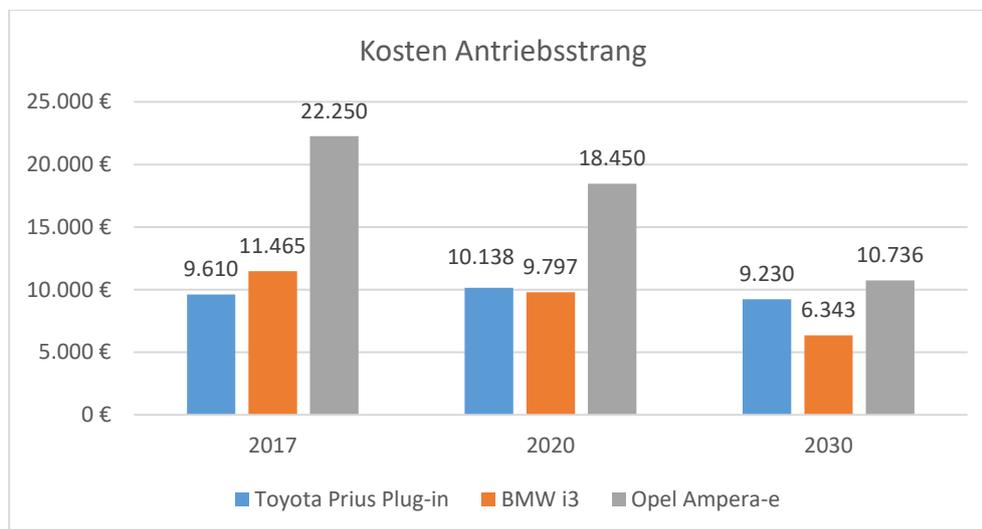


Abbildung 34: Kosten für den (E-) Antriebsstrang

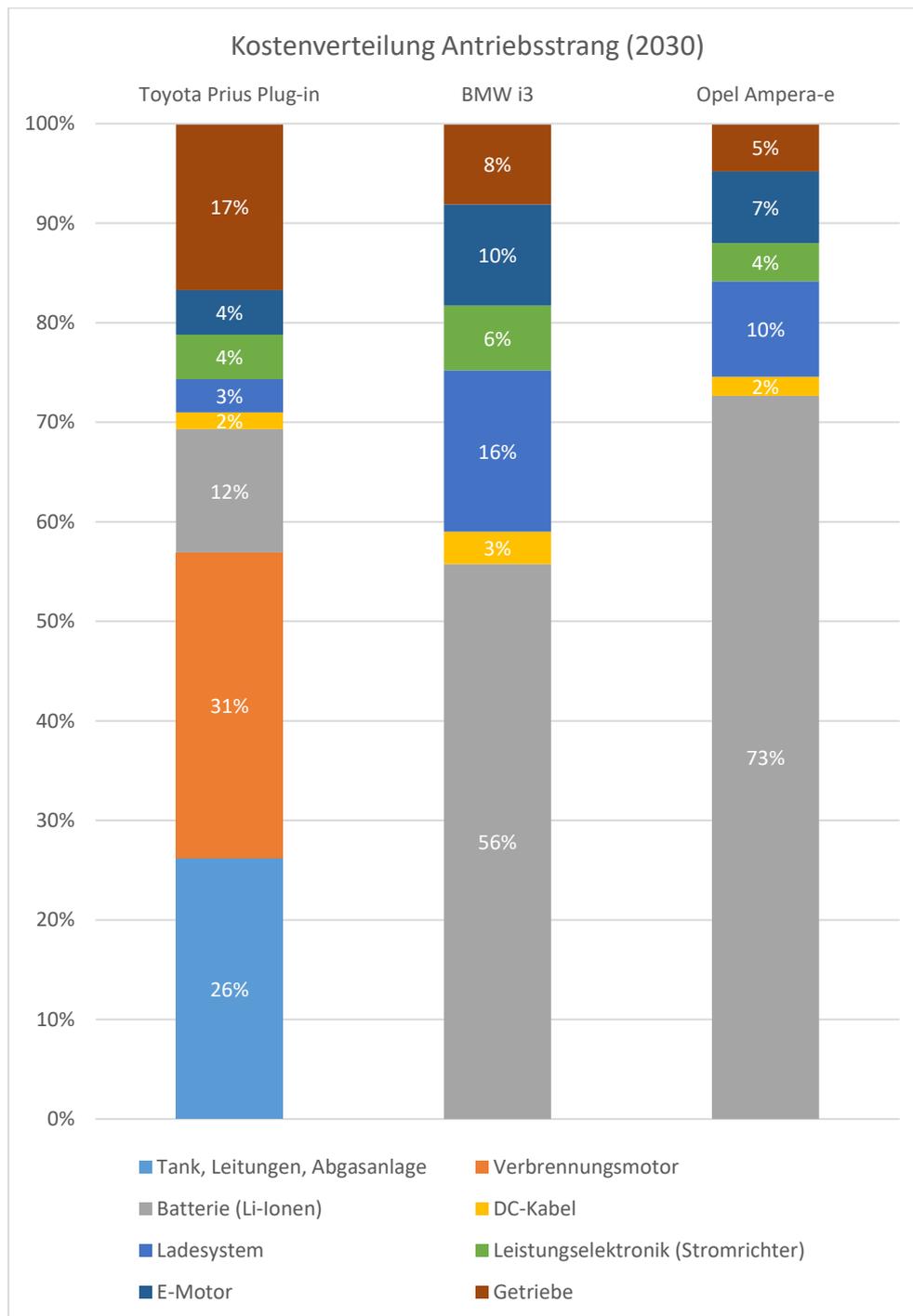


Abbildung 35: Kostenverteilung des Antriebsstrangs im Jahr 2030

Abbildung 35 visualisiert den erheblichen Anteil der Batteriekosten an den Gesamtkosten des Antriebsstrangs von Elektrofahrzeugen. Diese Kosten sind abhängig von der Batteriegröße. Wächst die Batterie steigen die Kosten und somit der prozentuale Anteil. Im Fall des Ampera-e liegen diese Kosten bei 73 %. Dies entspricht aktuellen Literaturwerten. Dabei wird ein Kleinwagen als Ausgangsfahrzeug angenommen, bei welchem die Batteriekosten mit 14.000 € beziffert werden. Die

Gesamtkosten für den elektrischen Antriebsstrang liegen bei 18.610 €. Dies ergibt einen Anteil von ca. 75 % (21, S. 26–27) (21). Weitere Kostenschwerpunkte liegen mit 7 % bis 10 % im E-Motor und mit 10 % bis 16 % im Ladesystem (Abb.35).

Das Plug-in-Fahrzeug besitzt derzeit die geringsten Batteriekosten, was auf die geringe Kapazität der Batterie zurückzuführen ist. Gerade einmal 12 % der Kosten entfallen auf das Batteriesystem. Im Gegenzug fällt der Kostenanteil für den Verbrennungsmotor sowie dessen Zubehör (Tank, Leitungen, Abgasanlage) mit ca. 57 % schwer ins Gewicht. Eine Verschiebung dieser Kosten ist durch eine neuartige Dimensionierung der Bauteile durchaus denkbar. Ein weiterer Kostenfaktor ist das Getriebe des Plug-in-Hybriden, dessen Anteil im Vergleich zum Elektrofahrzeug doppelt bzw. dreimal so groß ist. Gründe dafür sind die günstigere Entwicklung und Produktion von Ein- bzw. Zweiganggetriebe für reine Elektrofahrzeuge.

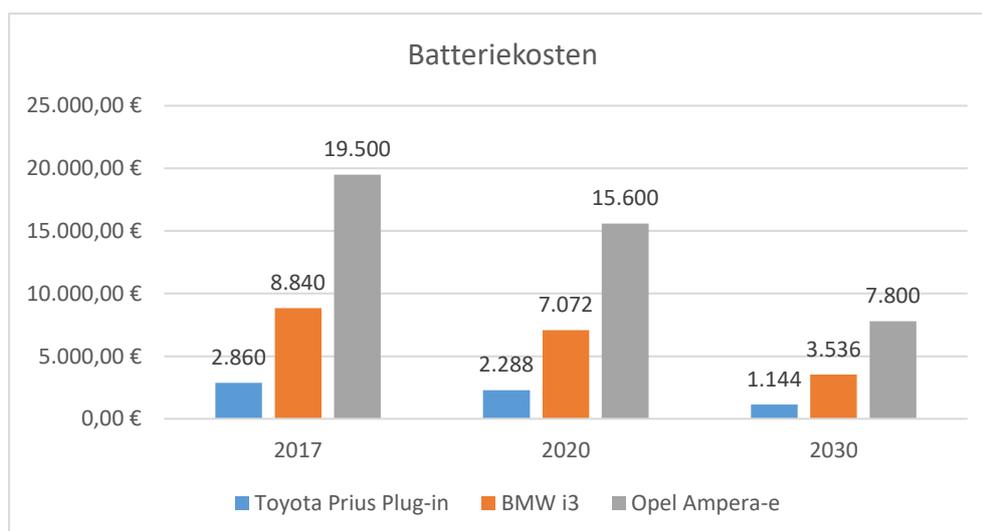


Abbildung 36: Absolute Batteriekosten der Vergleichsfahrzeuge

Im direkten Vergleich der Batteriekosten aus Abbildung 36 mit den Prognosewerten aus Abbildung 37 von HORVÁTH & PARTNERS, ergeben sich große Unterschiede für die Vergleichsjahre 2017 und 2020. Um die Werte aus Abbildung 7 nutzen zu können, werden die Werte, welche für Zellkosten aufgeführt sind, mit einem 30-prozentigen Aufschlag erhöht, um somit die Systemkosten für eine kWh der Batterie darzustellen. Trotz diesem Aufschlag unterscheiden sich die Werte dramatisch. Für das Jahr 2020 prognostiziert das Unternehmen Batteriekosten, welche circa bei der Hälfte der eigens errechneten Ergebnisse liegen. Wird für das Jahr 2030 ein ähnlicher Kostenverlauf angenommen, fallen die Batteriekosten auf ca. 70 €/kWh.

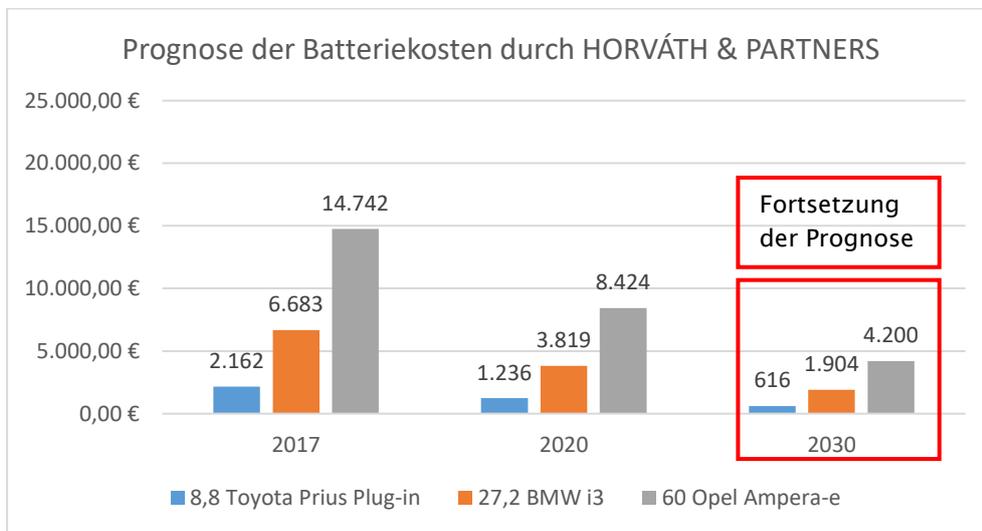


Abbildung 37: Absolute Batteriekosten durch Prognosen des Unternehmens HORVÁTH & PARTNERS (22)

Diese Annahme hat zur Folge, dass sich der prozentuale Anteil der Batteriekosten stark ändert. Am Beispiel des Ampera-e sinkt dieser Anteil somit von 73 % auf ca. 50 % ab. Dadurch wird deutlich welchen Schwankungen die zukünftigen Kostenentwicklungen unterliegen.

Um eine zusammenfassende Bewertung hinsichtlich der Total Cost of Ownership Ergebnisse durchzuführen, werden in Abbildung 38 und 39 die Unterschiede zwischen den errechneten Gesamtkosten und den Zielkosten dargestellt. Die Zielkosten werden unter Berücksichtigung eines Gewinns errechnet. Diese Gewinnspanne wird an die tatsächlichen Margen von Toyota (8 %), BMW (9,5 %) und Opel (1,3 %) angepasst (111).

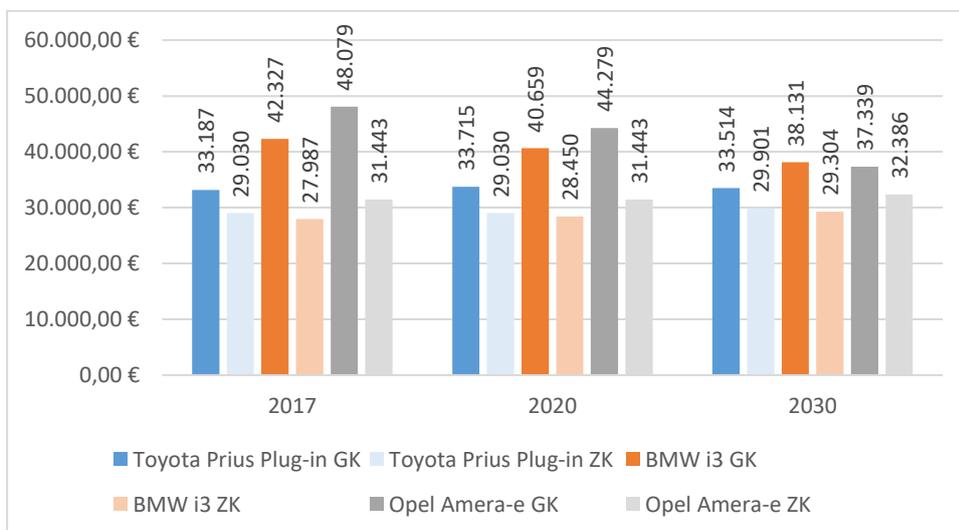


Abbildung 38: Übersicht zwischen errechneten Gesamtkosten und Zielkosten

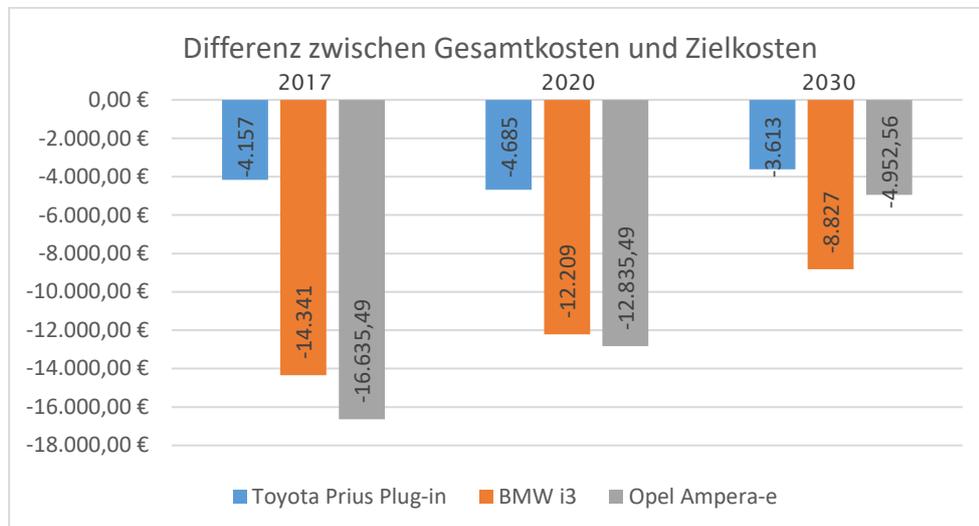


Abbildung 39: Differenz zwischen Gesamtkosten und Zielkosten unter Berücksichtigung einer individuellen Gewinnmarge

Auch in diesem Kontext ist die sinkende Differenz zwischen Gesamtkosten und Zielkosten durch rückläufige Batteriekosten zu erklären (Abb. 39). Die Differenz zwischen Gesamtkosten und Zielkosten liegt dabei bei 11 % (Toyota), 28 % (BMW) und 14 % (Opel) des Nettolistenpreises. Um die Gewinnmargen zu erreichen, muss demnach eine Kostenreduktion in Höhe der Differenzen vorgenommen werden. Besonders Kosten für Umlagen und Zuschläge sowie für das Basisfahrzeug verbuchen mit 41 % bis 43 % den größten Kostenanteil der Fahrzeugproduktion. Dennoch ist davon auszugehen, dass auch die Kosten im Segment des alternativen Antriebs noch intensiver gesenkt werden müssen. Neue Technologien oder neuartige Geschäftsmodelle können dabei eine entscheidende Rolle spielen. Speziell bei der Plug-in-Antriebstechnologie werden konventionelle Bauteile wie Verbrennungsmotor und Zubehör mit 57 % (Abb. 35) Kostenanteil weiterhin den Löwenanteil einnehmen. Diesbezüglich liegt hier ebenfalls weiteres Potential zur Kostenoptimierung.

6.4.3 Sensitivitätsanalyse

Im Verlauf der vorherigen Analysen wurden bereits Kostenpunkte aus Sicht des Produzenten auf deren Einflussstärke geprüft. Besonders die Batteriekosten unterstehen einer hohen Sensitivität und führen durch verschiedene Prognosen zu unterschiedlichen Ergebnissen. Nun sollen weitere Einflussfaktoren aus Sicht des Kunden auf deren Empfindlichkeit untersucht werden. Dazu zählen die Laufleistung, Kraftstoffkosten und Wartungs- und Reparaturkosten. Auf einer Skala von minus 50 % bis plus 50 % werden diese Werte einzeln verändert und aufgetragen. Dabei beziehen sich die Diagramme auf Fahrzeuge im Jahr 2030 (Abb. 40).

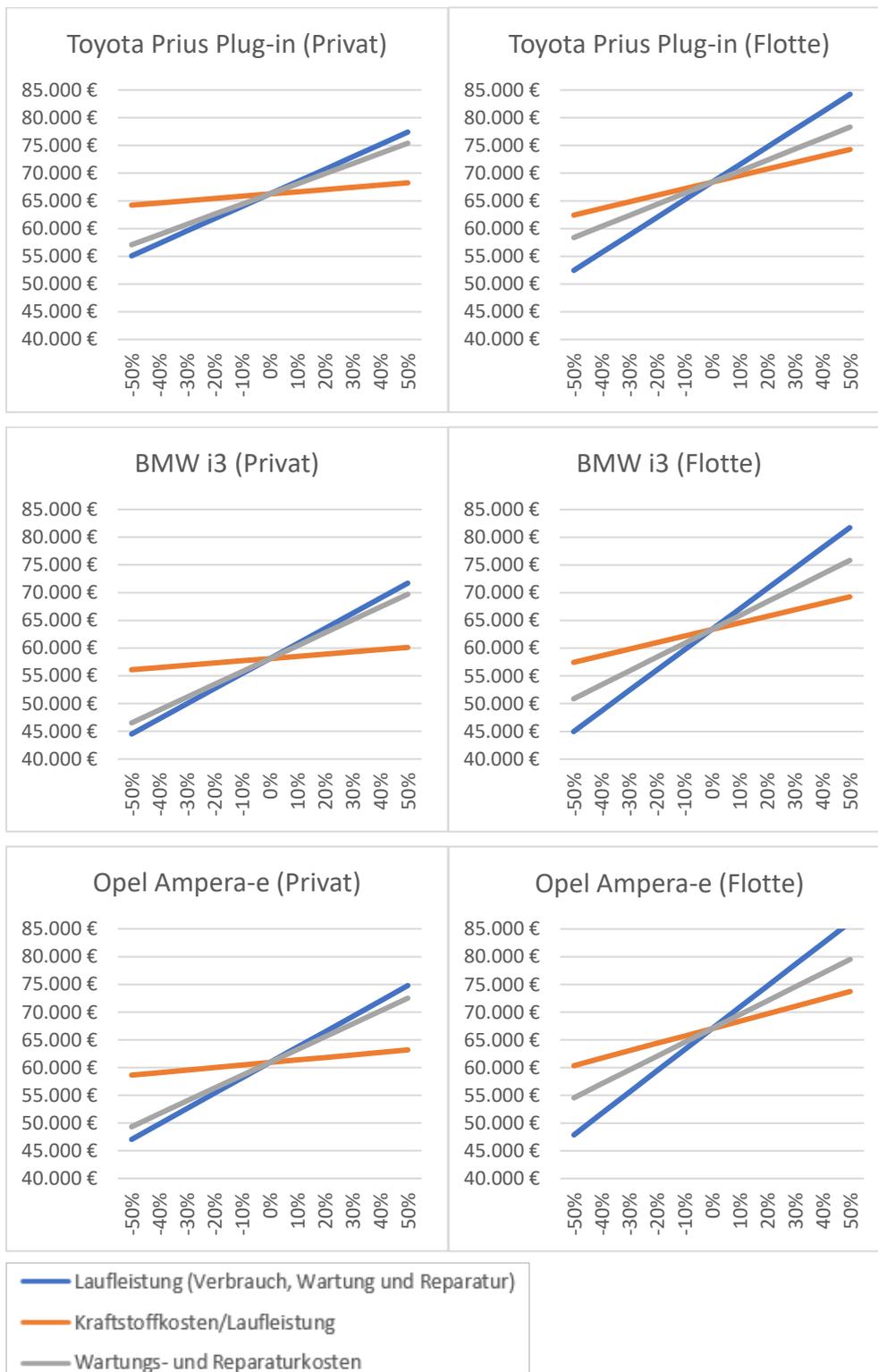


Abbildung 40: Sensitivitätsanalyse nach Fahrzeugtyp und Fahrprofil

In beiden Fällen (Privat- oder Flottenfahrzeug) besitzt die Laufleistung den größten TCO-Hebel. Grund dafür ist die Abhängigkeit der Kostenpunkte Kraftstoff und Wartung/Reparatur. Im Vergleich zur Laufleistung ist der Stellhebel Kraftstoffkosten jedoch sehr klein. Dabei ist jedoch anzunehmen, dass sich dieser Stellhebel in der Realität stark verändern könnte, indem sich Fahrzeugverbrauch, Kraftstoffkosten und die Laufleistung gleichzeitig erhöhen.

Durch den multiplikativen Einfluss des Fahrzeugverbrauchs, der Kraftstoffpreise und der Laufleistung auf den Kostenpunkt „Kraftstoffkosten“, kann in dieser Linie gleichzeitig abgelesen werden, was eine Veränderung des Fahrzeugverbrauchs oder der Kraftstoffpreise bewirken würde.

Der Unterschied zwischen Privat- und Flottenfahrzeug liegt in der Stärke der Stellhebel. Mit höherer Laufleistung, die dem Flottenfahrzeug von Anfang an zu gerechnet wird, wächst der Einfluss von Kraftstoffkosten und Fahrzeugverbrauch. Demnach entstehen große Abweichungen in der Total Cost of Ownership hauptsächlich durch das Fahrverhalten des Kunden.

7 Schlussbetrachtung und Ausblick

Die externen Einflussfaktoren auf konventionelle und alternative Antriebssysteme werden für die zukünftige Entwicklung des Automobils ausschlaggebend sein. Vor allem die staatlichen Regularien, zukünftige Kundenanforderungen und Ressourcenverfügbarkeit beeinflussen den weiteren Werdegang der Elektromobilität. Urbanisierung, Digitalisierung und Individualisierung drängen den Markt zu zeitnahen Lösungen. In Verbindung mit der Elektromobilität können dabei ein Mehrwert für den Kunden und somit Anreize zum Kauf geschaffen werden.

Für den Übergang zu Fahrzeugen mit elektrifiziertem Antriebsstrang wird der Faktor „Kosten“ eine entscheidende Rolle spielen. Ergebnisse in Kapitel 6 zeigen, wie wichtig die Reduktion der Herstellungskosten ist, um im Segment der Elektrofahrzeuge profitable Produkte zu verkaufen und gleichzeitig die Verkaufspreise reduzieren zu können.

Aus Sicht einer TCO-Analyse, bezogen auf die Gesamthaltedauer eines Fahrzeugs, entstehen kaum sichtbare Unterschiede zwischen einem Plug-in-Fahrzeug, welches zusätzlich konventionelle Verbrennungsantriebstechnologien mit sich führt, und einem reinen Elektrofahrzeug. Auch in den Anschaffungskosten unterscheiden sich die Fahrzeuge kaum. Die Sensitivitätsanalyse zeigt, die Nutzungsweise des Kunden hinsichtlich Haltedauer und Laufleistung ist ausschlaggebend für die Entwicklung der TCO.

Ein Ansatz um Kosten individuell an den Käufer und dessen Nutzungsprofil anzupassen zeigt folgende Überlegung. Wie die Ergebnisse in Kapitel 6 verdeutlicht haben tragen die Batteriekosten einen großen Anteil an der Diskrepanz zwischen Gesamtkosten und Zielkosten. Durch den Vergleich der Fahrzeuge entwickelt sich die Idee, zukünftige Fahrzeuge in einem Baukastensystem anzubieten, um dem Kunden die Wahlmöglichkeit zwischen Mehrkosten und der damit verbundenen Reichweite selbst zu überlassen. Durch die Annahme einer Volumenreduzierung der Batterie des Opel Ampera-e auf das Volumen des BMW i3, sinken die Kosten für die Batterie um ca. 50 %. Dieser Sachverhalt würde den Verlust im Jahr 2030 um ca. 3.900 € verringern. Zudem liegt der Ampera damit unter dem Verlustwert des Toyota Prius Plug-in. Negativ wirkt sich dieser Schritt auf die Reichweite des Opels aus, die sich in Folge dessen ebenfalls um die Hälfte reduziert.

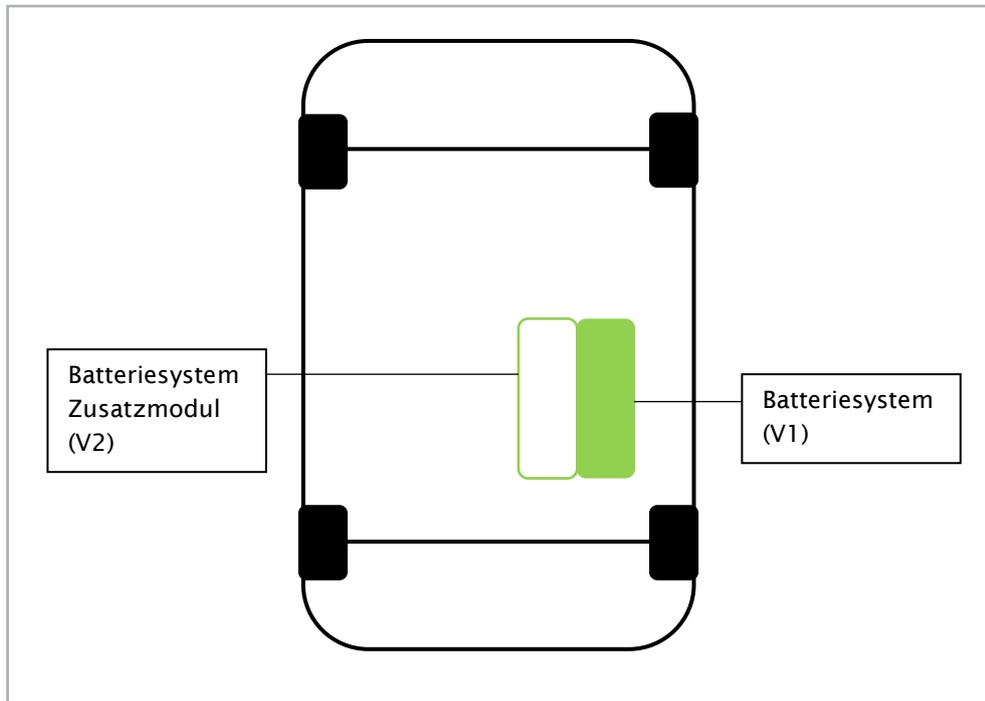


Abbildung 41: Vorlage zur Erläuterung der Auswahlmöglichkeiten aus Kundensicht

Es ist also denkbar zukünftige Fahrzeuge mit verschiedenen Batterieoptionen auf dem Fundament eines Basisfahrzeugs anzubieten (Abb. 41). Der Kunde kann letzten Endes selbst bestimmen, inwiefern das Fahrzeug durch Erweiterung des Batterievolumens an seine persönlichen Anforderungen angepasst werden soll. Es besteht die Wahlmöglichkeit zwischen Batterievolumen V1 und dem Zusatzvolumen V2 oder einer Plug-in-Hybrid Lösung. Schon heute wird dieses Prinzip der Wahlmöglichkeit der Batteriegröße durch Fahrzeuge wie dem Renault Zoe oder dem Tesla Model 3 angeboten.

Um die Zielkosten und den damit verbundenen Einsparungen, angelehnt an die Differenzen in Abbildung 39, zu erreichen, werden im Folgenden weitere Vorschläge aufgezählt. Vorerst werden mögliche Ansätze zur Kostenoptimierung des Antriebsstrangs erläutert.

1. Reduzierung der Batteriekosten

Um die Kostensenkung für Energiespeicher weiter voranzutreiben, werden vor allem Fortschritte in der Forschung und Entwicklung, als auch in der Produktion notwendig sein. Von der Kostenreduktion durch Ersatzstoffe (z.B. Co-Substituiert durch Nickel), über den Preisverfall der Elektrolyte bis hin zur Kostensenkung durch Standardisierung, können fortlaufende Entwicklungen und Optimierungen der Batterietechnologie entscheidende Faktoren für den Erfolg der Elektromobilität darstellen (112, S. 5).

2. Optimierung der konventionellen Antriebstechnologie

Die Kostenstruktur von Plug-in-Hybrid Fahrzeugen wird vom Kostensegment des Antriebsstranges und speziell der konventionellen Bauteile stark beeinflusst. Dahingehend sollten Optimierungen seitens des Verbrennungsmotors, Getriebe und Abgastechnik (ca. 65% der Kosten für den Antriebsstrang des Toyota Prius) ebenso gefördert werden, wie die intensive Forschung und Entwicklung von Batterietechnik oder anderer Bauteile für alternative Antriebskonzepte. So profitieren beispielsweise Kunde und Produzent gleichermaßen von Entwicklungen, welche den Wirkungsgrad drastisch verbessern.

Weitere betriebswirtschaftliche Ziele können durch einen modularen Verbrennungsmotoren-Aufbau unterstützt werden. Unter Berücksichtigung der CO₂-Gesetzgebung wird zeitgleich die Entwicklung von kompakten und leichten Aggregaten gefördert (9, S. 60–61).

Des Weiteren sollten die Kosten „Basisfahrzeug“ optimiert werden, da diese am Beispiel des BMW i3, einen Großteil der Gesamtkosten einnehmen. Ansätze dafür sind:

1. Vermeidung von Solitärplattformen am Beispiel des BMW i3

Die Kosten für Entwicklung neuer Fahrzeugkonzepte und derer Produktionslinien sind immens kostspielig. Aus diesem Grund sollten große Experimente hinsichtlich Design und Packaging vorerst nicht ausgereizt werden. Die Entwicklung von Elektrofahrzeugen könnte vorerst auf etablierten Baureihen fortgesetzt werden, um dabei Kosten zu sparen.

2. Verwendung von herkömmlichen Materialien

Großes Einsparpotential liegt auch in der Verwendung von kostengünstigen und bewährten Materialien. Am Beispiel des BMW i3 und dem großen Anteil an Carbon-Bauteilen ergibt sich die Möglichkeit der Kostenoptimierung durch Einsatz konventioneller Karosseriebauteile. Denn die Zusatzkosten für Carbon-Leichtbauteile erhöhen die Kosten für das Basisfahrzeug signifikant.

Darüber hinaus sollten die Kosten für Umlagen und Zuschläge berücksichtigt werden. Im Fokus stehen dabei die intensiven Entwicklungskosten, welche durch die bisher geringen Absatzzahlen der Elektrofahrzeuge kostenintensiv erscheinen. Ein möglicher Optimierungsansatz ist die **Kooperationen mit Wettbewerbern und Start-ups**. Die Kooperationen mit Wettbewerbern sollen dazu dienen, Entwicklungskosten zu teilen. Durch verschiedene Stärken und Schwächen können sich Hersteller vorerst ergänzen und Probleme im Bereich der e-mobility schneller

und kostengünstiger lösen. Auch der Verkauf von Fahrzeugen mit gleicher Plattform führt somit schneller zur Kostenreduzierung der Entwicklungskosten.

Durch die Zusammenarbeit mit Start-up Unternehmen können meistens brandaktuelle Themen, brillante Ideen und große Innovationen durch geringe Beteiligungen gesichert werden, da diese Unternehmen meist mit geringen finanziellen Ressourcen arbeiten. Immer auf der Suche nach „the next big thing“, weisen Start-ups einen überdurchschnittlichen Innovationshunger auf und generieren einen großen Mehrwert hinsichtlich der These „Immer einen Schritt voraus“.

Literatur

1. BUNDESMINISTERIUM FÜR UMWELT, NATURSCHUTZ, BAU UND REAKTORSICHERHEIT (BMUB), WWW.BMUB.BUND.DE. Klimaschutzplan 2050 - Klimaschutzpolitische Grundsätze und Ziele der Bundesregierung [online]. Verfügbar unter: http://www.bmub.bund.de/fileadmin/Daten_BMU/Download_PDF/Klimaschutz/klimaschutzplan_2050_kurz_f_bf.pdf
2. INTERNETSEITE DES BUNDESUMWELTMINISTERIUMS - BMUB. *EU-Klimapolitik* [online] [Zugriff am: 28. März 2017]. Verfügbar unter: <http://www.bmub.bund.de/themen/klima-energie/klimaschutz/eu-klimapolitik/>
3. WERNER TOBER. *Praxisbericht Elektromobilität und Verbrennungsmotor. Analyse elektrifizierter Pkw-Antriebskonzepte*. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2016. ISBN 978-3-658-13602-4.
4. KREYENBERG, D. *Fahrzeugantriebe für die Elektromobilität. Total Cost of Ownership, Energieeffizienz, CO₂-Emissionen und Kundennutzen*. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2016.
5. KLAUS SCHREINER. *Basiswissen Verbrennungsmotor. Fragen - Rechnen - Verstehen - Bestehen*. 2. Auflage. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2015. ISBN 978-3-658-06187-6.
6. VAN BASSHUYSEN, R. und F. SCHÄFER. *Handbuch Verbrennungsmotor*. 7. Auflage. Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag, 2005. ISBN 978-3-658-04678-1.
7. MUSEUM, D. *Deutsches Museum: A Motor Großansicht* [online] [Zugriff am: 22. Juni 2017]. Verfügbar unter: <http://www.deutsches-museum.de/sammlungen/meisterwerke/meisterwerke-iii/a-motor/a-motor-grossansicht/>
8. PISCHINGER, S. und U. SEIFFERT, Hg. *Vieweg Handbuch Kraftfahrzeugtechnik*. 8., aktualisierte und erweiterte Auflage. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2016. ATZ / MTZ-Fachbuch. ISBN 978-3-658-09528-4.
9. LIEBL, J., M. LEDERER, K. ROHDE-BRANDENBURGER, J.-W. BIERMANN, M. ROTH und H. SCHÄFER. *Energiemanagement im Kraftfahrzeug. Optimierung von CO₂-Emissionen und Verbrauch konventioneller und elektrifizierter Automobile*. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2014. ATZ/MTZ-Fachbuch. ISBN 978-3-658-04451-0.
10. SPRINGER PROFESSIONAL. *Pkw-Antriebe im Überblick - Vergangenheit, Gegenwart und Zukunft* [online] [Zugriff am: 2. Mai 2017]. Verfügbar unter: <https://www.springerprofessional.de/motorentchnik/pkw-antriebe-im-ueberblick-vergangenheit-gegenwart-und-zukunft/6561052>
11. ROBERT BOSCH GMBH. *Emissionsreduktion* [online]. 3 August 2017 [Zugriff am: 3. August 2017]. Verfügbar unter: http://www.bosch-engineering.de/de/de/einsatzgebiete/personenkraftwagen/antrieb/emissionsreduktion_2/emissionsreduktion_3.html

12. HELMUT TSCHÖKE, Hg. *Die Elektrifizierung des Antriebsstrangs. Basiswissen*. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2015. ISBN 978-3-658-04643-9.
13. DIETER SCHRAMM, M.K. *Das Automobil im Jahr 2025. Vielfalt der Antriebstechnik*. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2014. ISBN 978-3-658-04185-4.
14. PETER HOFMANN. *Hybridfahrzeuge. Ein alternatives Antriebssystem für die Zukunft*. 2. Auflage. Wien: Springer Verlag, 2014. ISBN 978-3-7091-1780-4.
15. WALLENTOWITZ, H. und A. FREIALDENHOVEN. *Strategien zur Elektrifizierung des Antriebsstranges. Technologien, Märkte und Implikationen*. 2., überarbeitete Auflage. Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag / Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH Wiesbaden, 2011. ATZ/MTZ-Fachbuch. ISBN 978-3-8348-1412-8.
16. MBTECH MERCEDES-BENZ TECHNOLOGY. *Hybrid - aus Komplexität wird Antrieb*. [online], 2009 [Zugriff am: 25. April 2017].
17. KARLE, A., Hg. *Elektromobilität. Grundlagen und Praxis*. 2., aktualisierte Auflage. München: Fachbuchverlag Leipzig im Carl Hanser Verlag, 2017. ISBN 978-3-446-45099-8.
18. STAN, C. *Alternative Antriebe für Automobile. Hybridsysteme, Brennstoffzellen, alternative Energieträger*. 4., aktualisierte und erweiterte Auflage. Berlin: Springer Vieweg, 2015. ISBN 978-3-662-48512-5.
19. KURZWEIL, P. *Brennstoffzellentechnik. Grundlagen, Komponenten, Systeme, Anwendungen*. 2., überarb. u. akt. Aufl. 2013. Wiesbaden: Springer, 2013. ISBN 978-3-658-00085-1.
20. KORTHAUER, R. *Handbuch Lithium-Ionen-Batterien*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2013. ISBN 978-3-642-30653-2.
21. KAMPKER, A. *Elektromobilproduktion*. Berlin: Springer Vieweg, 2014. ISBN 978-3-642-42021-4.
22. HORVÁTH & PARTNERS. *Preisentwicklung von Lithium-Ionen-Batterien / Prognose* [online] [Zugriff am: 16. Juni 2017]. Verfügbar unter: <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/534429/umfrage/weltweite-preise-fuer-lithium-ionen-akkus/>
23. KAMPKER, A., D. VALLÉE und A. SCHNETTLER. *Elektromobilität. Grundlagen einer Zukunftstechnologie*. Berlin: Springer, 2013. ISBN 978-3-642-31986-0.
24. BRÜNGLINGHAUS, C. *Antriebe für Elektrofahrzeuge: welcher Elektromotor ist der optimale?* [online] [Zugriff am: 28. Juni 2017]. Verfügbar unter: <https://www.springerprofessional.de/automobil---motoren/elektromotor/antriebe-fuer-elektrofahrzeuge-welcher-elektromotor-ist-der-opti/6562428>
25. VOGEL BUSINESS MEDIA GMBH & CO. KG. *Elektromotoren fürs Auto* [online] [Zugriff am: 28. Juni 2017]. Verfügbar unter:

- <http://www.automobil-industrie.vogel.de/elektromotoren-fuers-auto-a-262403/>
26. PETERS, A., C. DOLL, P. PLÖTZ, A. SAUER, W. SCHADE, A. THIELMANN, M. WIETSCHHEL und C. ZANKER. *Konzepte der Elektromobilität*: Nomos, 2013.
 27. JEB, C. und M. SCHADE. *Laden von Elektroautos: Tipps und Fakten - Stromtanken ohne Vertrag* [online] [Zugriff am: 4. August 2017]. Verfügbar unter: <http://www.autobild.de/artikel/laden-von-elektroautos-tipps-und-fakten-10949481.html>
 28. DAIMLER AG. *Unter der Lupe: Ladetechnologien: Laden leicht gemacht | marsMediaSite* [online] [Zugriff am: 4. August 2017]. Verfügbar unter: <http://media.daimler.com/marsMediaSite/de/instance/ko/Unter-der-Lupe-Ladetechnologien-Laden-leicht-gemacht.xhtml?oid=11110699>
 29. BUNDESMINISTERIUM FÜR UMWELT, NATURSCHUTZ, BAU UND REAKTORSICHERHEIT, BMUB, WWW.BMUB.BUND.DE. Entwurf eines Gesetzes zur Bevorrechtigung der Verwendung elektrisch betriebener Fahrzeuge (Elektromobilitätsgesetz – EmoG) [online]. Verfügbar unter: http://www.bmub.bund.de/fileadmin/Daten_BMU/Download_PDF/Verkehr/emog_gesetztentwurf_bf.pdf
 30. TRANSPORT FOR LONDON | EVERY JOURNEY MATTERS. *Congestion Charge (Official)* [online] [Zugriff am: 4. Mai 2017]. Verfügbar unter: <https://tfl.gov.uk/modes/driving/congestion-charge>
 31. BUNDESREGIERUNG. *Bundesregierung | Mobilität der Zukunft* [online] [Zugriff am: 4. Mai 2017]. Verfügbar unter: https://www.bundesregierung.de/Webs/Breg/DE/Themen/Energiewende/Mobilitaet/mobilitaet_zukunft/_node.html
 32. IEA - INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. *Global EV Outlook 2016* [online]. Verfügbar unter: https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/Global_EV_Outlook_2016.pdf
 33. DR.-ING. JÜRGEN KÖLCH. *Förderung von Elektromobilität in Deutschland im Vergleich zu anderen Ländern.*
 34. GOV.UK. *Print Plug-in car, motorcycle and van grants - GOV.UK* [online] [Zugriff am: 9. Mai 2017]. Verfügbar unter: <https://www.gov.uk/plug-in-car-van-grants/print>
 35. ZOLL. *Zoll online - Elektrofahrzeuge* [online] [Zugriff am: 5. Mai 2017]. Verfügbar unter: https://www.zoll.de/DE/Fachthemen/Steuern/Verkehrsteuern/Kraftfahrzeugsteuer/Steuervergünstigung/Elektrofahrzeuge/elektrofahrzeuge_node.html
 36. AMS. *Im Ausland teuer* [online]. 2 Juli 2008 [Zugriff am: 4. Mai 2017]. Verfügbar unter: <http://www.auto-motor-und-sport.de/news/co2-basierte-kfz-steuern-in-europa-im-ausland-teuer-1567395.html>
 37. ATOUT FRANCE. *Umweltzone Paris* [online]. 4 Mai 2017 [Zugriff am: 4. Mai 2017]. Verfügbar unter: <http://de.france.fr/de/info/umweltzone-paris>

38. FORSTER K. *Paris bans cars with even plates in third day of transport restrictions to ease air pollution* | *The Independent* [online]. 8 Dezember 2016 [Zugriff am: 4. Mai 2017]. Verfügbar unter: <http://www.independent.co.uk/news/world/europe/paris-banned-cars-even-number-plates-pollution-latest-public-transport-air-smog-bans-a7462621.html>
39. UMWELTBUNDESAMT. *Umweltzonen in Deutschland* [online]. 5 Mai 2017 [Zugriff am: 5. Mai 2017]. Verfügbar unter: <https://www.umweltbundesamt.de/themen/luft/luftschadstoffe/feinstaub/umweltzonen-in-deutschland#textpart-5>
40. REUß, L. *Blaue Plakette: Das muss man wissen!* | *autozeitung.de* [online] [Zugriff am: 5. Mai 2017]. Verfügbar unter: <http://www.autozeitung.de/blaue-plakette-diesel-umweltzone-127075.html>
41. UMWELTBUNDESAMT. *Pkw und leichte Nutzfahrzeuge* [online]. 5 Mai 2017 [Zugriff am: 5. Mai 2017]. Verfügbar unter: <https://www.umweltbundesamt.de/themen/verkehr-laerm/emissionsstandards/pkw-leichte-nutzfahrzeuge>
42. OFFICE, P. Verordnung (EU) Nr. 510/2011 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 11. Mai 2011 zur Festsetzung von Emissionsnormen für neue leichte Nutzfahrzeuge im Rahmen des Gesamtkonzepts der Union zur Verringerung der CO₂-Emissionen von Personenkraftwagen und leichten Nutzfahrzeugen Text von Bedeutung für den EWR [online]. Verfügbar unter: <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ%3AL%3A2011%3A145%3A0001%3A0018%3ADE%3APDF>
43. UMWELTBUNDESAMT. *Erneuerbare-Energien-Gesetz* [online] [Zugriff am: 5. Mai 2017]. Verfügbar unter: <https://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/erneuerbare-energien/erneuerbare-energien-gesetz#textpart-1>
44. BUNDESMINISTERIUM FÜR VERKEHR UND DIGITALE INFRASTRUKTUR. *Well-to-Wheel Betrachtung der Antriebstechnologien* [online] [Zugriff am: 15. August 2017]. Verfügbar unter: <https://www.forschungsinformationssystem.de/servlet/is/332825/>
45. VEREINIGTE LOHNSTEUERHILFE E.V. *Elektroauto und Steuer: Das müssen Sie beachten* [online]. 9 Mai 2017 [Zugriff am: 9. Mai 2017]. Verfügbar unter: <https://www.vlh.de/arbeiten-pendeln/dienstfahrten/elektroauto-und-steuer-das-muessen-sie-beachten.html>
46. ENVIRONMENTAL ADVOCATES OF NEW YORK. - *Electric Vehicle Rebate Integral to Reaching NY's Climate and Clean Energy Goals* [online] [Zugriff am: 5. Mai 2017]. Verfügbar unter: <http://www.eany.org/our-work/press-release/electric-vehicle-rebate-integral-reaching-ny%E2%80%99s-climate-and-clean-energy-goals>
47. BAY, L. *Model 3 wird enthüllt: Der Traum vom Tesla für alle* [online]. 6 Mai 2017 [Zugriff am: 6. Mai 2017]. Verfügbar unter:

- <http://www.handelsblatt.com/unternehmen/industrie/model-3-wird-enthuellt-hoehstgrenzen-der-foerderung/13360362-3.html>
48. NEW YORK STATE DEPARTMENT OF TRANSPORTATION. *Clean Pass Program* [online] [Zugriff am: 6. Mai 2017]. Verfügbar unter: <https://www.dot.ny.gov/portal/page/portal/programs/clean-pass>
 49. GUILFORD, D. *ZEV mandates get harder to ignore* [online]. 5 Mai 2017 [Zugriff am: 5. Mai 2017]. Verfügbar unter: <http://www.autonews.com/article/20160627/OEM11/306279987/zev-mandates-get-harder-to-ignore>
 50. CALIFORNIA CLEAN CARS CAMPAIGN. *Zero Emission Vehicle* [online], 2016. Verfügbar unter: http://calcleancars.org/wp-content/uploads/2016/10/ZEV-Fact-Sheet-Members_Final.pdf
 51. PRESSE, F.N. *Info: Abgasnormen in USA und Europa | Frankfurter Neue Presse* [online] [Zugriff am: 3. August 2017]. Verfügbar unter: <http://www.fnp.de/nachrichten/wirtschaft/Info-Abgasnormen-in-USA-und-Europa;art686,1602129>
 52. PROFF, H. und H. PROFF. *Dynamisches Automobilmanagement. Strategien für international tätige Automobilunternehmen im Übergang in die Elektromobilität*. 2., aktualisierte und überarb. Aufl. Wiesbaden: Springer Gabler, 2013. ISBN 978-3-8349-4561-7.
 53. MANDEL, B.H. *NYC Vehicle Fleet Sustainability Plan* [online]. Verfügbar unter: <http://www1.nyc.gov/assets/sustainability/downloads/pdf/publications/NYC%20Clean%20Fleet.pdf>
 54. XIAOYING, D. *China accelerates upgrade of emissions standards - Business - Chinadaily.com.cn* [online]. 22 Februar 2016 [Zugriff am: 11. Mai 2017]. Verfügbar unter: http://www.chinadaily.com.cn/business/motoring/2016-02/15/content_23490210.htm
 55. DELPHI. *2016/2017 Worldwide Emissions Standards* [online]. Verfügbar unter: <http://delphi.com/docs/default-source/worldwide-emissions-standards/delphi-worldwide-emissions-standards-passenger-cars-light-duty-2016-7.pdf>
 56. LORENZ, T. *E-Mobilität in Norwegen, USA und China: Markt für Elektroautos: Das „Tesla-Wunder“ im Schatten Chinas | shz.de* [online]. 3 April 2016 [Zugriff am: 3. August 2017]. Verfügbar unter: <https://www.shz.de/deutschland-welt/wirtschaft/markt-fuer-elektroautos-das-tesla-wunder-im-schatten-chinas-id13162746.html>
 57. PWC AUTOFACTS. *Microsoft Word - Autofacts Analyst Note - China EV Update (Sep 2016) FINAL.docx* [online]. Verfügbar unter: <http://www.pwc.com/gx/en/automotive/autofacts/analyst-notes/pdf/pwc-analyst-note-china-ev-update.pdf>
 58. XIN, C. *Beijing unveils measures to ease traffic flow* [online]. 24 Dezember 2010 [Zugriff am: 11. Mai 2017]. Verfügbar unter: http://www.chinadaily.com.cn/cndy/2010-12/24/content_11748230.htm

59. ERLING, J. *Smog-Alarm: Fahrverbot für jedes zweite Auto in Peking geplant* - WELT [online]. 1 Januar 2013 [Zugriff am: 11. Mai 2017]. Verfügbar unter:
<https://www.welt.de/vermishtes/article121148043/Fahrverbot-fuer-jedes-zweite-Auto-in-Peking-geplant.html>
60. SUWEI, F. / QIANG, L. *Car Ownership Control in Chinese Mega Cities: Shanghai, Beijing and Guangzhou* [online]. Verfügbar unter:
https://www.lta.gov.sg/ltacademy/doc/13Sep040-Feng_CarOwnershipControl.pdf
61. AUTOZEITUNG.DE. *E-Autos: Elektroquote in China ab 2018* | *autozeitung.de* [online] [Zugriff am: 11. Mai 2017]. Verfügbar unter:
<http://www.autozeitung.de/china-elektroquote-136922.html>
62. GIESEN, C. / FROMM, T. *Deutsche Autohersteller sind entsetzt über chinesische Elektroquote* [online] [Zugriff am: 11. Mai 2017]. Verfügbar unter: <http://www.sueddeutsche.de/wirtschaft/e-autos-deutsche-automobilhersteller-sind-entsetzt-ueber-chinesische-elektroquote-1.3228492>
63. SPRINGER GABLER VERLAG. *Definition » Urbanisierung «* | *Gabler Wirtschaftslexikon* [online]. 17 Mai 2017 [Zugriff am: 17. Mai 2017]. Verfügbar unter:
<http://wirtschaftslexikon.gabler.de/Definition/urbanisierung.html>
64. TAUBENBÖCK, H., Hg. *Globale Urbanisierung. Perspektive aus dem All*. Berlin: Springer Spektrum, 2015. ISBN 978-3-662-44841-0.
65. UNITED NATIONS. *Anteil der Bevölkerung in Städten weltweit bis 2050* | *Statistik* [online] [Zugriff am: 29. Mai 2017]. Verfügbar unter:
<https://de.statista.com/statistik/daten/studie/37084/umfrage/anteil-der-bevoelkerung-in-staedten-weltweit-seit-1985/>
66. POPULATION DIVISION. *Prognose zur Entwicklung der Weltbevölkerung bis 2100* | *Statistik* [online] [Zugriff am: 29. Mai 2017]. Verfügbar unter:
<https://de.statista.com/statistik/daten/studie/1717/umfrage/prognose-zur-entwicklung-der-weltbevoelkerung/>
67. BMVI. *Verkehrsprognose 2030* [online]. Verfügbar unter:
https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Anlage/VerkehrUndMobilitaet/verkehrsprognose-2030-praesentation.pdf?__blob=publicationFile
68. WGRUENDINGER. (Microsoft Word - Diskussionspapier Connected Cars - Gesch\344ftsmodelle FINAL-FINAL) [online]. Verfügbar unter:
http://www.bvdw.org/presseserver/ConnectedCars/BVDW_Diskussionspapier_ConnectedCars_Gesch%C3%A4ftsmodelle.pdf
69. BMVI. *Strategie automatisiertes und vernetztes Fahren* [online]. Verfügbar unter:
https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Publikationen/StB/broschuere-strategie-automatisiertes-ernetztes-fahren.pdf?__blob=publicationFile
70. GRÜNDERSZENE. *Unternehmen: ally* [online] [Zugriff am: 19. Mai 2017]. Verfügbar unter:
<http://www.gruenderszene.de/datenbank/unternehmen/ally>

71. BMW AG. *BMW ConnectedDrive : ConnectedDrive Services* [online] [Zugriff am: 22. Mai 2017]. Verfügbar unter: <http://www.bmw.de/de/topics/faszination-bmw/connecteddrive/digital-services/connecteddrive-services.html>
72. DAIMLER AG. *Mercedes me connect* [online] [Zugriff am: 22. Mai 2017]. Verfügbar unter: http://www.mercedes-benz.de/content/germany/mpc/mpc_germany_website/de/home_mpc/passengercars/home/mercedes-me/overview/connect-me.html
73. NAGEL, P. *Projekt mit DHL: Smart testet Kofferraumzustellung - carIT* [online] [Zugriff am: 22. Mai 2017]. Verfügbar unter: <http://www.car-it.com/smart-testet-kofferraumzustellung/id-0046771>
74. STRELOW, M. / WUSSMANN, M. *Digitalisierung in der Automobilindustrie* [online]. Wer gewinnt das Rennen? Traditioneller Automobilhersteller oder Silicon Valley? Verfügbar unter: <http://i-b-partner.com/wp-content/uploads/2016/08/2016-09-06-Iskander-RZ-Whitepaper-Digitalisierung-in-der-Automobilindustrie-DIGITAL.pdf>
75. ACCENTURE GMBH. *Wie die Autoindustrie die Chancen der Digitalisierung richtig nutzt* [online]. Verfügbar unter: https://www.accenture.com/_acnmedia/Accenture/Conversion-Assets/DotCom/Documents/Global/PDF/Industries_18/Accenture-Automobilwoche-Beilage-2015-German.pdf
76. ADIENT LTD. & CO. KG. *Das Auto als Lebensraum: Sitzen wie zuhause / IAA 2015: Johnson Controls präsentiert Lösungen zum Megatrend Individualisierung* [online] [Zugriff am: 23. Mai 2017]. Verfügbar unter: <http://www.presseportal.de/pm/19526/3124276>
77. WITTMANN, D. *Automobil als Unikat - der Trend zur Individualisierung - News* [online] [Zugriff am: 23. Mai 2017]. Verfügbar unter: <http://auto-presse.de/autonews.php?newsid=234006>
78. DAIMLER AG. *CASE: Neue strategische Schwerpunktsetzung in der Mercedes-Benz Cars Strategie | Daimler* [online] [Zugriff am: 24. Mai 2017]. Verfügbar unter: <https://www.daimler.com/innovation/specials/elektromobilitaet/case.html>
79. HAMBURG.DE GMBH & CO. KG. *Hamburg und Volkswagen vereinbaren strategische Mobilitätspartnerschaft* [online] [Zugriff am: 24. Mai 2017]. Verfügbar unter: <http://www.hamburg.de/pressearchiv-fhh/6789402/2016-08-29-pr-mobilitaetspartnerschaft/>
80. VGB POWER TECH. *Prognostizierte statische Reichweite von Ressourcen | Statistik* [online] [Zugriff am: 2. Juni 2017]. Verfügbar unter: <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/152334/umfrage/statische-reichweite-von-ressourcen/>
81. BP. *Top-15 Länder mit dem höchsten Erdölverbrauch 2015 | Statistik* [online] [Zugriff am: 2. Juni 2017]. Verfügbar unter: <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/233302/umfrage/laender-mit-dem-hoechsten-erdoelverbrauch-2011/>

82. BPB. *Peak Oil* | *bpb* [online] [Zugriff am: 2. Juni 2017]. Verfügbar unter: <http://www.bpb.de/nachschlagen/zahlen-und-fakten/globalisierung/52761/peak-oil>
83. OPEC und IEA. *Preisentwicklung ausgewählter OPEC-Rohöle bis 2017* | *Statistik* [online] [Zugriff am: 6. Juni 2017]. Verfügbar unter: <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/810/umfrage/rohoelpreis-entwicklung-pec-seit-1960/>
84. BP. *Weltweite Erdölreserven nach Region 2015* | *Statistik* [online] [Zugriff am: 6. Juni 2017]. Verfügbar unter: <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/173866/umfrage/oelreserven-nach-weltregion/>
85. PROF. DR. RALF WÖRNER. Vorlesungsmanuskript - Nachhaltige Mobilität.
86. FIVEANDFRIENDS GMBH. *BDL - Bundesverband Deutscher Leasing-Unternehmen e. V.: April 2017* [online] [Zugriff am: 8. Juni 2017]. Verfügbar unter: <https://bdl.leasingverband.de/newsletter/newsletter/ausgaben-2017/april-2017/>
87. KBA. *Kraftfahrt-Bundesamt - Verkehr in Kilometern* [online] [Zugriff am: 10. Juni 2017]. Verfügbar unter: http://www.kba.de/DE/Statistik/Kraftverkehr/VerkehrKilometer/verkehr_in_kilometern_node.html
88. REDAKTION, t.h. *500.000 km und mehr: Taxiunternehmer und ihre treuen Weggefährten - Taxiunternehmer und ihre treuen Weggefährten | Weiterführende Artikel | Das bundesweite Taxi-Magazin | taxi heute - das bundesweite Taxi-Magazin* [online]. 12 Juni 2017 [Zugriff am: 12. Juni 2017]. Verfügbar unter: <http://www.taxi-heute.de/Das-bundesweite-Taxi-Magazin/5418/Artikel/500-000-km-und-mehr-Taxiunternehmer-und-ihre-treuen-Weggefaherten>
89. REDAKTION, t.h. *taxi Thema des Monats Mai 2010 | Durchschnittliches Kölner Elend | taxi heute - das bundesweite Taxi-Magazin* [online]. 12 Juni 2017 [Zugriff am: 12. Juni 2017]. Verfügbar unter: <http://www.taxi-heute.de/Taxi-Branche/taxi-Thema-des-Monats-Mai-2010/7412/Durchschnittliches-Koelner-Elend>
90. TOYOTA. *Toyota Österreich - Hybrid Entwicklung und Geschichte* [online] [Zugriff am: 9. Juni 2017]. Verfügbar unter: <https://www.toyota.at/hybrid-innovation/introducing-hybrid/hybrid-entwicklung.json>
91. TOYOTA. Angebot Toyota Prius Plug-in Comfort.
92. TOYOTA MOTOR EUROPE. Prius Plug-in-Hybrid [online], 2017 [Zugriff am: 28. Mai 2017]. Verfügbar unter: doi:10.1055/s-0036-1594415
93. ADAC. *Toyota Prius 1.8 Plug-In Hybrid Comfort ADAC Info - Autodatenbank Detailseite* [online] [Zugriff am: 26. Juni 2017]. Verfügbar unter: <https://www.adac.de/infotestrat/autodatenbank/autokatalog/detail.aspx?mid=266469&show=Kosten>

94. HILTSCHER, B. *BMW: Elektroauto i3 basiert auf 40 Jahren Forschung und Entwicklung* [online]. 9 Juni 2017 [Zugriff am: 9. Juni 2017]. Verfügbar unter: <http://www.autozeitung.de/bmw-elektroauto-geschichte-1602-e1-i3-activee-mini-e-rolls-royce-elektro-gn-401706-63126.html?image=1>
95. BMW. *BMW i3: Erleben* [online] [Zugriff am: 9. Juni 2017]. Verfügbar unter: <http://www.bmw.de/de/neufahrzeuge/bmw-i/i3/2015/erleben.html>
96. BMW. Angebot BMW i3 (94Ah).
97. BMW. *BMW i3: Technische Daten* [online] [Zugriff am: 10. Juni 2017]. Verfügbar unter: <https://m.bmw.de/de/neufahrzeuge/bmw-i/i3/2016/technische-daten.html#tab-0>
98. ADAC. BMW i3 (94 Ah) [online]. Verfügbar unter: https://www.adac.de/_ext/itr/tests/Autotest/AT5542_BMW_i3_94_Ah/BMW_i3_94_Ah.pdf
99. STEGMAIER, G. und H. WITTICH. *Genug Reichweite, zuwenig Autos* [online]. 15 Mai 2017 [Zugriff am: 17. Juli 2017]. Verfügbar unter: <http://www.auto-motor-und-sport.de/news/opel-ampera-e-2017-infos-daten-preise-marktstart-765522.html>
100. OPEL. Der neue Ampera-E. Geladen mit neuem Denken.
101. ADAC. *Opel Ampera-E ADAC Info - Autodatenbank Detailseite* [online] [Zugriff am: 17. Juli 2017]. Verfügbar unter: <https://www.adac.de/infotestrat/autodatenbank/autokatalog/detail.aspx?mid=275079&bezeichnung=opel-ampera-e-ab-10-17>
102. OPEL. Der neue Ampera-E. Preise, Ausstattungen und technische Daten, 20. April 2017.
103. BMW. *E-Mobilität - Original BMW Zubehör* [online] [Zugriff am: 19. Juli 2017]. Verfügbar unter: <http://www.bmw.de/de/topics/service-zubehoer/original-bmw-zubehoer-finden.categoryId=ManufacturerAccessoryCategory9.html?bmw=KouU66PtNFoNvRPUUQ6lDwPjGOULPe&lmatchtype=e&lbcreative=190324981343&lbnetwork=g&lkeyword=bmw%20i3%20wallbox>
104. INFOROAD GMBH. *Die günstigsten Diesel, Sprit, Benzinpreise, Tankstellen in Ihrer Stadt* [online] [Zugriff am: 13. Juli 2017]. Verfügbar unter: http://www.clever-tanken.de/tankstelle_liste?spritsorte=5&r=5&lat=48.7784485&lon=9.18001318&ort=70173+Stuttgart
105. HEIDJANN GMBH CO.KG. *Was kostet Strom? Strompreis in kWh* [online] [Zugriff am: 17. Juli 2017]. Verfügbar unter: <https://www.stromauskunft.de/strompreise/was-kostet-strom/>
106. ADAC. *BMW i3 (94 Ah) ADAC Info - Autodatenbank Detailseite* [online] [Zugriff am: 12. Juli 2017]. Verfügbar unter: <https://www.adac.de/infotestrat/autodatenbank/autokatalog/detail.aspx?mid=255581&bezeichnung=bmw-i3-94-ah>
107. GEDDES, NEIL J. - WGV VERSICHERUNG AG. Tarifauskunft Kfz-Versicherung. Toyota Prius Plug-in, 14.000km.

108. GEDDES, NEIL J. - WGV VERSICHERUNG AG. Tarifauskunft - Kfz-Versicherung. Toyota Prius Plug-in, 60.000km.
109. GEDDES, NEIL J. - WGV VERSICHERUNG AG. Tarifauskunft Kfz-Versicherung. BMW i3 - 14.000km.
110. GEDDES, NEIL J. - WGV VERSICHERUNG AG. Tarifauskunft Kfz-Versicherung. BMW i3 - 60.000km.
111. ONLINE, F. *Das verdienen Autohersteller pro Fahrzeug* [online]. 17 August 2016 [Zugriff am: 27. Juli 2017]. Verfügbar unter: http://www.focus.de/auto/ratgeber/kosten/gewinne-steigen-groesse-ist-nicht-alles-ueberraschende-zahlen-das-verdienen-die-hersteller-wirklich-an-ihren-autos_id_5829607.html
112. THIELMANN, A., A. SAUER und M. WIETSCHEL. Gesamt-Roadmap Energiespeicher für die Elektromobilität 2030 [online]. Verfügbar unter: <http://www.isi.fraunhofer.de/isi-wAssets/docs/t/de/publikationen/GRM-ESEM.pdf>

Anlagenverzeichnis

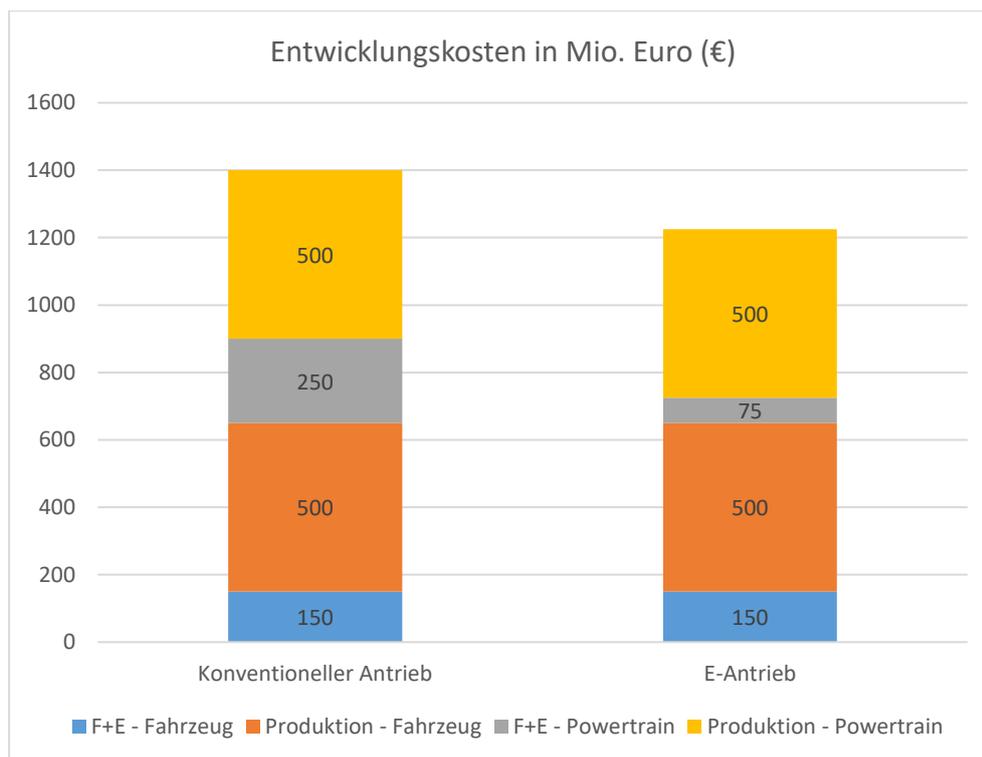
Anlage A1 Beispielrechnung Entwicklungskosten

A1 Beispielrechnung Entwicklungskosten

Die Entwicklungskosten werden Anhand folgender Beispielrechnung bestimmt. Dabei wird davon ausgegangen, dass der jährliche Absatz des Plug-in Fahrzeugs bei ca. 250.000 Einheiten mit einem Lifecycle von 7 Jahren liegt. Dies entspricht einer Produktions- und Absatzmenge von 1.750.000 Fahrzeugen.

Auf Seiten der reinen Elektrofahrzeuge wird mit einem jährlichen Absatz von ca. 60.000 Einheiten und ebenfalls einem Lifecycle von 7 Jahren geplant. Die Produktions- und Absatzmenge entspricht 420.000 Fahrzeugen.

Um die Entwicklungskosten pro Fahrzeug zu berechnen, müssen die abgebildeten Gesamtentwicklungskosten durch die jeweiligen Fahrzeugmengen dividiert werden.



Ergebnis der Berechnung von Entwicklungskosten pro Fahrzeug:

Plug-in-Hybrid Fahrzeuge ca. 800 €
 Elektrofahrzeuge ca. 2.900 €

Selbstständigkeitserklärung

Hiermit erkläre ich, die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt zu haben. Die Arbeit wurde bisher in gleicher oder ähnlicher Form keiner anderen Prüfungsbehörde vorgelegt und auch nicht veröffentlicht. Ich bin mir bewusst, dass eine unwahre Erklärung rechtliche Folgen haben wird.

Stuttgart, den 16.08.2017

.....
(Unterschrift)