

**Wirtschaftlichkeitsanalyse alternativer Fahrzeugantriebe:
Ein Vollkostenvergleich**

Masterarbeit

zur Erlangung des akademischen Grades „Master of Science (M.Sc.)“ im Studiengang
Wirtschaftswissenschaft der Wirtschaftswissenschaftlichen Fakultät der Leibniz Universität
Hannover

vorgelegt von

Name: Latifi



Vorname: Shkurta



Prüfer: Prof. Dr. rer. nat. Michael H. Breitner

Hannover, den 30.06.2016

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung

Abbildungsverzeichnis	I
Tabellenverzeichnis	III
Abkürzungsverzeichnis	IV
1 Einleitung	1
1.1 Ausgangslage und Motivation	1
1.2 Vorgehensweise und Aufbau der Arbeit	4
2 Theoretischer Bezugsrahmen	6
2.1 CO ₂ -Regulierung Europa	6
2.2 Antriebskonzepte	8
2.2.1 Konventionelle Antriebe	9
2.2.2 Alternative Antriebe	10
2.3 Aktuelle Marktsituation in Deutschland	12
2.4 Bewertungsansätze	18
2.4.1 Ökologische Bewertung	18
2.4.2 Nutzerakzeptanz	21
2.4.3 Ökonomische Bewertung – Total Cost of Ownership	22
3 Wirtschaftlichkeitsanalyse auf Grundlage der Total Cost of Ownership	24
3.1 Methodik und Annahmen	25
3.2 Parameter der Gesamtkostenberechnung	27
3.3 Sensitivitäten und Szenarien	39
3.4 Berechnungsmodell	52
4 Ergebnisse	56
4.1 Total Cost of Ownership	56
4.2 Sensitivitätsanalyse	68
4.3 Zusammenfassung	85
4.4 Diskussion und Limitationen	87
5 Handlungsempfehlungen	94
6 Fazit und Ausblick	99
Literaturverzeichnis	101
Anhang	125
Ehrenwörtliche Erklärung	143

1 Einleitung

1.1 Ausgangslage und Motivation

Individuelle Mobilität stellt seit Jahrzehnten ein Grundbedürfnis jeder modernen Gesellschaft dar. Auf dieser Basis erlebte die Automobilindustrie in der Vergangenheit ein beständiges Wachstum. Vor allem konnte sich der Verbrennungsmotor auf Basis fossiler Kraftstoffe in den vergangenen Jahren als dominierender Fahrzeugantrieb durchsetzen. Eine hohe Reichweite, gute Fahrdynamik sowie günstige Kostenstrukturen bildeten den Ursprung dieses Erfolgs.

Mit einer weltweit steigenden Anzahl an Fahrzeugen werden jedoch auch die Nebeneffekte der konventionellen Antriebsarten immer deutlicher. Der steigende Bedarf an Öl, gedeckt durch lediglich eine geringe Anzahl an Förderländern, hat zu hohen Treibhausgasemissionen geführt. Die Rahmenbedingungen der Märkte sind durch schwankende Preise der konventionellen Kraftstoffe und strikter werdende Gesetzesanforderungen hinsichtlich erlaubter CO₂-Emissionen geprägt. Außerdem wird, verstärkt durch globale Diskussionen über die Klimaerwärmung und Ressourcenausschöpfung, ein verantwortungsbewussteres Konsumverhalten in der Gesellschaft ausgelöst, was zu wachsenden Kundenanforderungen in Bezug auf eine ökologische Nachhaltigkeit der Fahrzeuge führt. Diese Veränderungen bedingen heute eine tiefgreifende Umgestaltung des automobilen Sektors.

Die Ölkrise in den Jahren 1973 und 1979, die durch Drosselungen der Ölfördermengen ausgelöst wurden, machten den westlichen Industrienationen deutlich, wie groß ihre Abhängigkeit vom endlichen Rohstoff Rohöl ist. Direkte Folgen der Ölkrise waren stark steigende Kraftstoffpreise (Wallentowitz et al., 2010, S.1). Dies führte zu Versuchen, Elektrofahrzeuge wieder in den Verkehrsbereich einzubinden. Das Ergebnis war das erste Car-Sharing-Projekt der Welt „Witkar“ in Amsterdam mit 35 Elektroautos. Durch wieder deutlich sinkende Ölpreise wurde das Projekt 1986 allerdings mangels Erfolgs wieder eingestellt. Vor allem nahmen benzinbetriebene Fahrzeuge wieder eine Führungsrolle im Verkehrssektor ein (Schulz, 2015, S.9).

Heute sind die begrenzte Verfügbarkeit und die steigenden CO₂-Emissionen wieder Treiber für internationale Anstrengungen den verstärkten Einsatz von alternativen Antriebsformen zu fördern. Die Zukunftsfähigkeit konventioneller Antriebe wird vor dem Hintergrund der immer strikter werdenden Abgasgesetzgebung zunehmend in Frage gestellt, denn ihr Optimierungspotenzial hinsichtlich Verbrauch und Emissionen ist begrenzt, ebenso ihre Kongruenz mit den geänderten Anforderungen an automobilen Antriebstechnologien. Die Erschließung von CO₂-Reduktionspotenzialen im Verkehrsbereich und gleichzeitig die Verringerung der Energieimportabhängigkeit treiben Fahrzeughersteller dazu ihre Entwicklungsaktivitäten vermehrt auf alternative Antriebskonzepte zu fokussieren, die sich durch höhere Effizienz und ein deutlich besseres Emissionsverhalten auszeichnen.

Im Zuge der Neuausrichtung der zukünftigen Antriebsstrategie der Automobilhersteller nimmt seit einigen Jahren insbesondere die Elektrifizierung des Antriebsstrangs eine zentrale Rolle ein. Eine Hybridisierung der Fahrzeuge durch die Erweiterung des konventionellen Antriebs mit elektrifizierten Komponenten oder rein elektrisch betriebene Fahrzeuge wie Elektro- oder Brennstoffzellenfahrzeuge versprechen für die Zukunft eine adäquate Antwort auf die Herausforderungen zu bieten. Der Ausbau von Elektrifizierungsmaßnahmen ist mit der Aufnahme der Elektromobilität in das Integrierte Energie- und Klimaprogramm der Bundesregierung (IKEP) von 2007 auch politisch verankert (Bundesregierung, 2007, S.16). Konkrete Maßnahmen zur Förderung einer flächendeckenden Verbreitung von elektrifizierten Antriebsformen werden in dem im August 2009 verabschiedeten Nationalen Entwicklungsplan Elektromobilität (NEE) spezifiziert. Hierin hat sich die Bundesregierung das Ziel gesetzt zum Leitmarkt für Elektromobilität zu werden und eine Million Elektrofahrzeuge im Jahr 2020 und fünf Millionen in 2030 im deutschen Straßenverkehr zu haben (BMBF, 2009, S.6). Sukzessiv sollen durch umfangreiche Förderpakete die Weichen für die Weiterentwicklung von Elektrofahrzeugen gestellt werden.

Auch für den fossilen Energieträger Erdgas als Kraftstoff formuliert die Bundesregierung ein Ziel: In 2020 soll in Deutschland ein Marktanteil von 4 Prozent erreicht werden, was ungefähr einer Anzahl von bis zu 1,4 Millionen Erdgasfahrzeugen in 2020 entspricht. Durch einen deutlich geringeren Schadstoff- und CO₂-Ausstoß als konventionelle Pkw sind Erdgasfahrzeuge insbesondere vor dem Hintergrund der gestiegenen legislativen Anforderungen eine vielversprechende Alternative (Bundesregierung, 2004, S.187).

Allerdings gibt es derzeit einige Faktoren, die eine Nutzung von alternativen Antriebsarten wie Erdgas- und Elektrofahrzeuge im Vergleich zu konventionellen Antrieben einschränken. Eines der größten Hemmnisse stellt derzeit die Reichweitenbegrenzung dar. Bei Elektrofahrzeugen konnten in der Batterietechnologie durch die Weiterentwicklung der Li-Ionen Technologie in den letzten Jahren zwar große Fortschritte erzielt werden (Ketterer et al., 2010, S.8), allerdings lassen sich mit reinen Elektrofahrzeugen aufgrund des Batteriegewichts vergleichsweise nur geringe Reichweiten von durchschnittlich 150 Kilometern realisieren (Daleske et al., 2015, S.350). Mit einer durchschnittlichen Reichweite zwischen 250 und 400 Kilometern (Wittkamp, 2014), liegen die Reichweiten von monovalenten Erdgasfahrzeugen über denen von Elektrofahrzeugen, allerdings werden sie im Vergleich zu herkömmlichen Pkw, mit denen Fahrstrecken von 500 bis 1000 Kilometern ohne erneutes Tanken möglich sind (Kaiser et al., 2008, S.23), trotzdem als zu gering eingeschätzt, sodass ihre Verbreitung in Deutschland noch sehr gering ist.

Auch in Bezug auf die Kosten sind derzeit noch deutliche Unterschiede zwischen alternativen und herkömmlichen Antriebsarten zu erkennen. Bei Elektrofahrzeugen bspw. übersteigen die

Kosten für den Energiespeicher aufgrund der hohen Batteriepreise teilweise die gesamten restlichen Fahrzeugkosten, was wiederum zu hohen Anschaffungskosten führt (Thielmann et al., 2010, S.4). Zur Reduzierung des Kostengefälles zwischen batterieelektrischen und konventionellen Fahrzeugen hat die Bundesregierung im April 2016 eine Kaufpreisprämie für Elektrofahrzeuge beschlossen. Für Elektrofahrzeuge mit einem Kaufpreis unter 60.000 Euro erhalten private Käufer und Unternehmen eine Kaufprämie in Höhe von 4.000 Euro, für Hybridfahrzeuge beträgt die Kaufprämie 3.000 Euro. Diese Regelung tritt ab Mai 2016 in Kraft. Es wird insgesamt einer Fördersumme von 1,2 Milliarden Euro bereitgestellt, die jeweils zur Hälfte von Bund und Automobilindustrie getragen werden. Laut den Angaben des Verkehrsministeriums können mit dieser Summe bis zu 500.000 Elektrofahrzeuge gefördert werden (Bundesregierung, 2016).

Auch die Anschaffungsausgaben für Erdgasfahrzeuge sind in der Regel aufgrund von höheren Kosten für Motor, Speicheranlage und Wartung höher als die von Benzin- oder Dieselfahrzeugen. Im Durchschnitt ergeben sich für ein Erdgasfahrzeug Mehrkosten zwischen 2.000 und 5.000 im Vergleich zu herkömmlichen Antrieben (Bundesregierung, 2004, S.177). Der Kraftstoff Erdgas wird seit 2006 durch einen reduzierten Energiesteuersatz subventioniert, sodass sich deutlich niedrigere Energiekosten ergeben (Heidt et al., 2013, S.14).

Ob sich die Investition in ein Elektro- oder Erdgasfahrzeug im Laufe eines Fahrzeuglebens durch die geringeren Betriebskosten amortisiert, hängt wesentlich von dem Nutzungsmuster ab. Bei Elektroautos ist dies zusätzlich von der Auslastung der Batterie abhängig. Die Lebensdauer des Fahrzeugs wird auch von der Batterie selbst begrenzt, da diese sowohl in Abhängigkeit der Zyklisierung bzw. des Lade- und Entladeverhaltens als auch rein kalendarisch altert (Thielmann et al., 2012, S.10).

Da der Anschaffungspreis beim Fahrzeugkauf, vor allem bei Elektrofahrzeugen, als primäres Entscheidungskriterium von privaten Nutzern gesehen wird (Keuschen und Marner, 2014, S.14), soll in dieser Arbeit ein Berechnungsmodell entwickelt werden, welches zur Diskussion und Beantwortung der folgenden Fragestellungen beiträgt:

- (1) Sind alternative Antriebsarten, wie Erdgas- oder Elektrofahrzeuge, in der Lage die Mehrausgaben bei der Anschaffung durch geringere laufende Kosten zu kompensieren, sodass sie auf Kostenebene eine konkurrenzfähige alternative Antriebsform darstellen können?
- (2) Sind die bisher beschlossenen Förderungsmaßnahmen der Bundesregierung ausreichend, um eine Kostenparität mit herkömmlichen Antrieben zu erreichen?
- (3) Unter welchen Rahmenbedingungen und Nutzungsmustern stellen alternative Antriebe eine ökonomisch attraktive Lösung dar?

Zur Beantwortung dieser Fragen wird im Folgenden zunächst die allgemeine Vorgehensweise genauer beleuchtet.

1.2 Vorgehensweise und Aufbau der Arbeit

Kern des Vorhabens ist die Betrachtung der Gesamtnutzungskosten (engl. Total Cost of Ownership, TCO) verschiedener Fahrzeuge, um herauszufinden, ob alternative Fahrzeugantriebe eine wettbewerbsfähige und alternative Mobilitätsform gegenüber Benzin- und Dieselfahrzeugen darstellen. In dieser Arbeit werden Erdgasfahrzeuge (engl. Compressed Natural Gas, CNG) und Elektrofahrzeuge (engl. Battery Electric Vehicle, BEV) als alternative Antriebsformen vergleichbaren konventionellen Benzin- und Dieselfahrzeugen gegenübergestellt. Auf der Basis der Gesamtnutzungskosten sollen über einen Vergleich dieser bei verschiedenen Nutzungsmustern und unterschiedlichen Rahmenbedingungen die oben genannten Fragestellungen beantwortet werden. Dazu wird für jede Antriebsart ein Fahrzeugmodell ausgewählt, das in dieser Arbeit als Referenzmodell für die jeweilige Antriebsart gilt. Da sich für Fahrzeuge unterschiedlicher Fahrzeugklassen unterschiedliche optimale Nutzungsmuster ergeben, werden die Größenklassen Klein, Mittel und Groß betrachtet. Für alle Fahrzeugmodelle werden alle relevanten Kosten zusammengetragen und analysiert.

Eingeführt wird in die Thematik mit wesentlichen Rahmendaten zu den Märkten und Antrieben. Hierbei wird dargestellt, welche CO₂-Vorgaben europäische Neuwagenflotten heute und in Zukunft einhalten müssen. Außerdem erfolgen eine kurze technische Beschreibung der hier betrachteten Antriebsarten und eine Darstellung ihrer Marktentwicklung und aktuellen Marktsituation in Deutschland. Anschließend werden verschiedene Ansätze zur Bewertung von Fahrzeugantrieben vorgestellt, d. h. die Fahrzeugantriebe können auf Basis verschiedener Eigenschaften wie bspw. ihrer Umweltbilanz oder ihres Akzeptanzpotenzial bei Nutzern verglichen werden. Der Fokus liegt in dieser Arbeit aber bei der ökonomischen Bewertung der Fahrzeugantriebe in Form einer Total-Cost-of-Ownership-Analyse.

Welche Annahmen getroffen und Kostenparameter zur ökonomischen Bewertung herangezogen wurden, wird in der anschließenden Wirtschaftlichkeitsanalyse auf Grundlage der Total-Cost-of-Ownership umrissen. Zudem wird ein Überblick über die unterschiedlichen Szenarien gegeben, die in dieser Arbeit untersucht werden. In den Szenarien werden unterschiedliche Rahmenbedingungen unterstellt und zentrale Eingangsgrößen verändert und anschließend im Kontext von Sensitivitätsanalysen diskutiert. Dies geschieht im Rahmen eines entwickelten Berechnungsmodells.

Die Auswertung der Ergebnisse erfolgt im vierten Abschnitt der Arbeit. Es wird herausgearbeitet, welche Kostenunterschiede sich zwischen den verschiedenen Antriebsarten ergeben. Die Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse zeigen außerdem, welchen Einfluss veränderte Rahmenbe-

dingungen auf die Kostenunterschiede haben. Im Rückgriff auf die Eingangsfragen wird festgestellt, ob sich der Einsatz von Erdgas- und Elektrofahrzeugen, vor dem Hintergrund der Ergebnisse der Wirtschaftlichkeitsanalyse, für private Fahrzeughalter aus einem ökonomischen Standpunkt betrachtet, lohnt.

In Form von Empfehlungen an einzelne Beteiligte, z. B. die Politik oder Fahrzeughersteller, soll aufgezeigt werden, welche Maßnahmen eine größere Verbreitung von alternativen Antriebsarten fördern würden. Die Arbeit schließt mit einem kurzen Fazit und einen Ausblick hinsichtlich der zukünftigen Entwicklung der Fahrzeugantriebe ab.

Einen graphischen Überblick über das gewählte methodische Vorgehen gibt die folgende Abbildung:

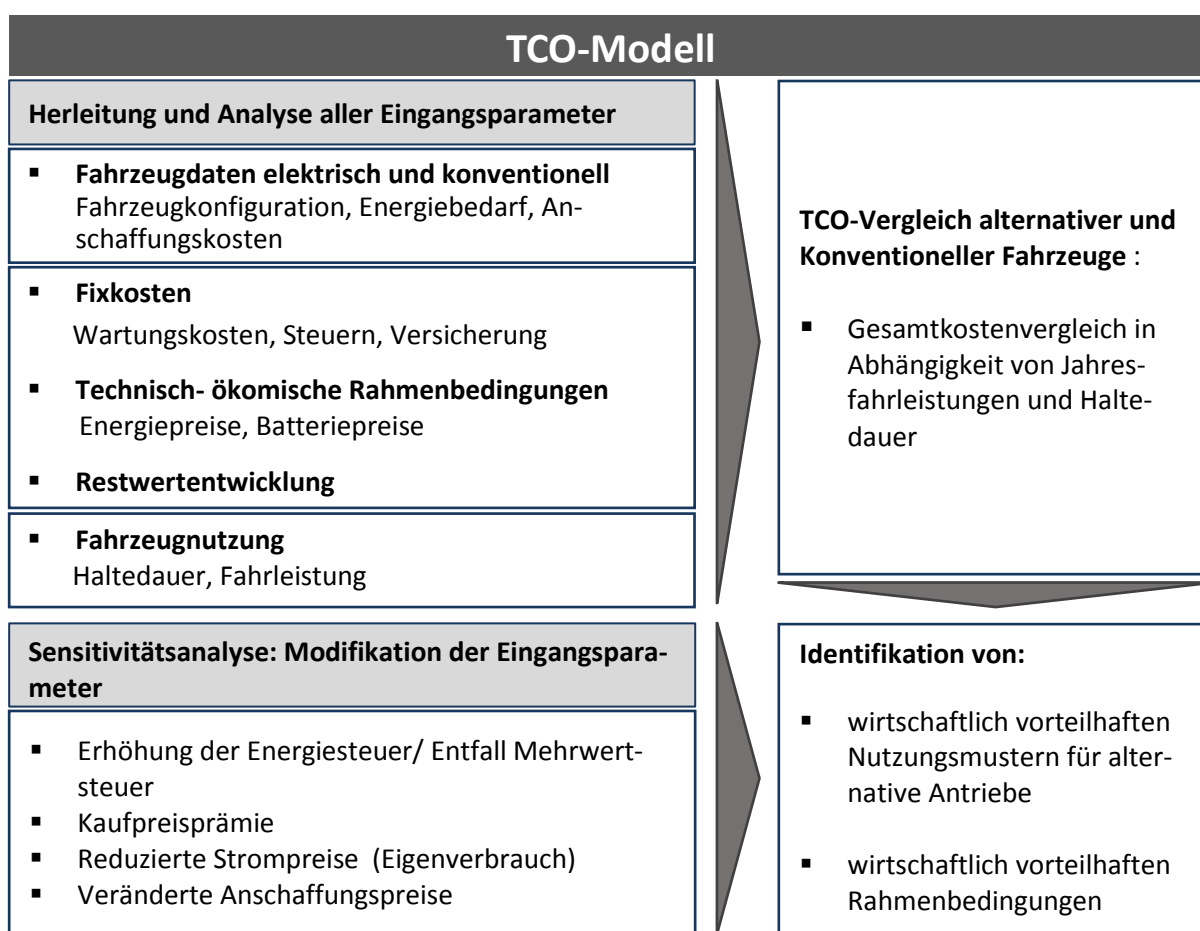


Abbildung 1-1: Überblick des methodischen Vorgehens

6 Fazit und Ausblick

Ziel der vorliegenden Arbeit war es, durch einen umfassenden Gesamtkostenvergleich das wirtschaftliche Potenzial alternativer Antriebe zu erfassen und mit herkömmlichen Antriebsarten zu vergleichen. Das dazu entwickelte TCO-Modell diente zur Berechnung und Gegenüberstellung der Gesamtkosten in Abhängigkeit von durchschnittlichen Fahrprofilen und Nutzungsjahren. Weiterhin wurden im Rahmen von Sensitivitätsanalysen relevante Kostenparameter wie Batterie- oder Kraftstoffpreise verändert, um ihren Einfluss auf die Wirtschaftlichkeit der jeweiligen Antriebsarten zu erkennen. Daraus sollten außerdem verschiedene Nutzungsmuster und Rahmenbedingungen abgeleitet werden, unter denen alternative Antriebe Gesamtkostenvorteile gegenüber den konventionellen Vergleichsfahrzeugen erzielen. Das Ergebnis der Wirtschaftlichkeitsanalyse fiel deutlich zugunsten der Erdgasfahrzeuge aus. Diese boten in jedem Fahrzeugsegment ein ökonomisch attraktives Gesamtkostenniveau. Die Elektrofahrzeuge hingegen erreichten nur unter sehr besonderen Rahmenbedingungen ein, mit konventionellen Fahrzeugen vergleichbares Gesamtkostenniveau. Auch der Kaufpreiszuschuss in Höhe von 4.000 Euro ist nicht ausreichend, um den Gesamtkostennachteil der Elektrofahrzeuge aufzuwiegen. Die identifizierten Nutzungsmuster, bei denen Elektrofahrzeuge nur noch geringe Mehrkosten zeigten, waren mit hohen Jahresfahrleistungen und langer Nutzungsdauer verbunden. Elektrofahrzeuge gelten derzeit jedoch vordergründig als Stadtautos (Götz et al., 2011, S.6), sodass hohe Fahrleistungen nur schwer realisierbar erscheinen. Zudem schränkt die Batteriekapazität die Reichweite eines BEV weiter ein. Bei sinkenden Batteriepreisen kann ein Elektrofahrzeug auch ohne finanzielle Subventionen ökonomisch wettbewerbsfähig sein, wie die Gegenüberstellung der Gesamtkostenbilanz in 2015 und 2020 gezeigt hat. Damit sich Elektrofahrzeuge langfristig erfolgreich und vor allem nachhaltig durchsetzen, muss genau dies erreicht werden, der Markt muss sich selbst tragen und ohne Subventionen auskommen.

Aktuell nimmt in Deutschland das Engagement in die Verbreitung von Elektroautos in der Tat deutlich zu. Lange Zeit hatte sich die Bundesregierung dagegen gewehrt Käufern eine Kaufpreisprämie zu zahlen, da es nicht Aufgabe des Staates sei den Absatz von Elektroautos voranzubringen, sondern die der Autohersteller. Im Frühjahr 2016 folgte die Bundesregierung dem Beispiel anderer Länder und beschloss dann doch den Kaufpreiszuschuss. Eine höhere Investitionsbereitschaft ist auch auf Seiten der Automobilhersteller zu erkennen. Nicht nur, dass sie den Betrag der Kaufpreisprämie hälftig übernehmen, große deutsche Hersteller kündigen zudem nach und nach umfangreiche Investitionen in die Elektromobilität an. Der Fokus liegt dabei insbesondere in der Entwicklung der Batterietechnologie. Neben den amerikanischen Elektroautohersteller Tesla verfügen aktuell vor allem Unternehmen aus Asien über das notwendige Know How für die Produktion von möglichst leistungsfähigen und kostengünstigen Batterien (Harendt et al., 2015, S.22). Um eine Abhängigkeit von Batterieimporten zu vermeiden, so wie

es derzeit etwa mit den Ölimporten ist, wollen sich die großen deutschen Hersteller wie Volkswagen, BMW und Daimler auf eine Batteriefertigung in Deutschland fokussieren (Langenbacher, 2016a). Die Batterie wird als Schlüssel für den Durchbruch von Elektrofahrzeugen in den Massenmarkt gesehen, da die aktuelle Batterietechnologie zu sehr viel höheren Grundpreisen und begrenzten Reichweiten führt (Thielmann et al., 2010, S.4). Klar ist, dass diese für die Zukunft längeren Lebenszyklen standhalten sowie leistungsstärker, leichter und günstiger werden müssen, was langfristig durch Intensivierungen der Forschung und Entwicklung auch erreicht werden soll, sodass viel höhere Reichweiten realisierbar sein werden (BMBF, 2011, S.20). Erst dieses Jahr kündigte bspw. Mercedes-Benz an, dass ein Elektroauto mit 400 bis 500 Kilometer Reichweite in Planung sei und in 2018 erscheinen werde. Zudem strebt Mercedes weiter an alle Baureihen zu elektrifizieren (Langenbacher, 2016b). Dass Elektroautos in Deutschland zunehmend an Bedeutung gewinnen, zeigt auch das Beispiel der Deutschen Post. Diese will mittelfristig nur noch Elektroautos für die Brief- und Paketzustellung einsetzen und damit nach und nach Dieselfahrzeuge im Zustellbetrieb ersetzen (Baumann, 2016). Auch über die deutschen Landesgrenzen hinaus vermehren sich die Aktivitäten hinsichtlich einer stärkeren Integration von Elektroautos in den Straßenverkehr. Norwegen und die Niederlande haben sich sogar für einen Verkaufsstopp für Verbrennungsmotoren ab 2025 ausgesprochen (Sorge, 2016).

Es wird deutlich, dass sich die zukünftige Mobilität stark in Richtung Elektromobilität bewegt. Erdgasfahrzeuge hingegen drohen Auslaufmodelle zu werden. Die Angebotspalette von Erdgasautos ist in etwa vergleichbar mit der von Elektrofahrzeugen. Allerdings fehlt eine offensive Vermarktung von Erdgasfahrzeugen seitens der Hersteller, die dadurch zunehmend aus der Wahrnehmung von Kunden verschwinden (Dena, 2011, S.18). Zudem standen in 2015 den Erdgastankstellen mehr Schließungen als Neueröffnungen gegenüber (Höhne, 2016).

Für Erdgasfahrzeuge scheint sich demnach ein negativer Trend in Deutschland zu entwickeln. In Hinblick auf Elektrofahrzeug allerdings ist deutlich zu erkennen, dass sowohl auf Herstellerseite als auch auf Seiten des Staates versucht wird eine weitreichende Marktpräsenz im Straßenverkehr voranzubringen. Begründet wird dieses Ziel mit der Verringerung der Abhängigkeit von Ölimporten sowie der Reduktion von Schadstoff- und CO₂-Emissionen. Zudem können Elektrofahrzeuge als mobile Speicher dienen und damit einen wichtigen Beitrag zur Stabilisierung des Stromnetzes beitragen (Horst et al., 2009, S.8; BMVBS, 2011, S.4). Aktuell besteht jedoch noch großer Handlungsbedarf in Bezug auf die Kosten, die Technologie und die Lademöglichkeiten, die derzeit noch zu gesellschaftlichen Akzeptanzproblemen führen.