evolution2green

ARBEITSPAPIER

PKW-Antriebe

Transformationsfeldanalyse im Rahmen des Projekts Evolution2Green – Transformationspfade zu einer Green Economy

Jens Clausen (Borderstep)

Stand: Januar 2017

Eine Kooperation von: Borderstep Institut, iZT Institut für Zukunftsstudien und Technologiebewertung, adelphi

Projektleitung

adelphi research gemeinnützige GmbH
Alt-Moabit 91 T +49 (0)30-89 000 68-0 www.adelphi.de
14193 Berlin F +49 (0)30-89 000 68-10 office@adelphi.de

Projektpartner

Borderstep Institut für Innovation und Nachhaltigkeit gemeinnützige GmbH
Clayallee 323 T: +49 (0)30 - 306 45 1000 www.borderstep.de
14169 Berlin info@borderstep.de

IZT - Institut für Zukunftsstudien und Technologiebewertung gemeinnützige GmbH
Schopenhauerstr. 26 T: +49 (0) 30 80 30 88-0 www.izt.de
14129 Berlin info@izt.de

Abbildung Titel: © riiseimage Fotolia_com

evolution2green wird gefördert vom Bundesministerium für Bildung und Forschung.

FONA
Sozial-ökologische Forschung
BMBF

© 2017 **adelphi, Borderstep, IZT**

Executive Summary

The present analysis was carried out as part of the project “Evolution2Green – Transformation Pathways towards a Green Economy: Shaping Path Change”. As one of four studies in the area “auto mobility”, it deals with the field of transformation of “vehicle drives”, characterized by significant environmental externalities, as well as impediments to transformation.

The paper describes the field of transformation, as well as the actors involved. Within the frame of the analysis, firstly, path dependencies were identified that present barriers to the transformation towards a sustainable economy. Secondly, relevant approaches for a transformation approaches were analyzed.

Especially strong path dependencies, understood here as having an especially significant stabilizing effect on the current system and thus representing a major obstacle for path change, have been identified as follows:

- Low prices for gas and diesel fuel enable car driving for a price, which the drivers with a view on the usefulness of cars in general are willing to pay.
- Up to the 1990s there were no real advancements to develop alternative car drives in Germany. Today, a large share of international patents for electric and fuel cell drives are held by East Asian companies.
- Car manufacturers as well as their suppliers are very much tied to the internal combustion engine (ICE). A share of 25% of employment in the suppliers industry is coupled to the ICE-drive technology.
- A lack of effective environmental regulation concerning the emission of nitrogen oxides, particulate matter and greenhouse gases make it attractive for manufacturers to incrementally improve their products instead of developing fundamental changes of the drive technology.

Besides car industry, suppliers and associated representative bodies, the car driving population as well as mobility associations and certain governmental institutions are important actors involved in the field of mobility.

As transformation approaches electric drives, fuel cell drives and hybrid drive concepts are considered for a path change towards a Green Economy.

Zusammenfassung

Die vorliegende Transformationsfeldanalyse wurde im Rahmen des Projekts „Evolution2Green – Transformationspfade zu einer Green Economy: den Pfadwechsel gestalten“ angefertigt. Als eine von vier Studien aus dem Bereich „Automobilität“ thematisiert sie das durch signifikante Umweltauswirkungen und erhebliche Transformationshemmnisse geprägte Transformationsfeld „PKW-Antriebe“.

Die vorliegende Transformationsfeldanalyse wurde im Rahmen des Projekts „Evolution2Green – Transformationspfade zu einer Green Economy: den Pfadwechsel gestalten“ angefertigt. Als eine von vier Studien aus dem Bereich „Automobilität“ thematisiert sie das durch signifikante Umweltauswirkungen und erhebliche Transformationshemmnisse geprägte Transformationsfeld „PKW-Antriebe“.

Das Papier beschreibt das Transformationsfeld sowie beteiligte Akteure. Im Rahmen der Untersuchung wurden Pfadabhängigkeiten identifiziert, die eine Transformation hin zu einer nachhaltigen Wirtschaftsweise verhindern. Weiter wurden relevante Transformationsansätze analysiert.

Als besonders starke Pfadabhängigkeiten, also jene, die das derzeitige System in besonders hohem Ausmaß stabilisieren und somit ein besonders starkes Hemmnis für einen Pfadwechsel darstellen, wurden folgende identifiziert:

- Niedrige Preise für Benzin und Diesel ermöglichen das Autofahren zu einem Preis, den die Autofahrer und Autofahrerinnen – mit Blick auf seinen Nutzen – offensichtlich zu zahlen bereit sind.
- Bis in die 1990er Jahre hinein wurden ernsthafte Anstrengungen zur Entwicklung alternativer Antriebe in Deutschland nicht gemacht. Heute z.B. wird ein Großteil der Patente für dem elektrischen Antriebsstrang von Unternehmen in Ostasien gehalten.
- Die Bindung der Hersteller wie auch der Zulieferer an den Verbrennungsmotor ist stark. Etwa ein Viertel der Arbeitsplätze in der Zulieferbranche sind konkret an den Antriebsstrang für Verbrennungsmotoren gebunden.
- Wenig wirksame umweltrechtliche Vorschriften zur Reduktion des Ausstoßes von Treibhausgasen, Stickoxiden und Feinstaub machen es für die Hersteller attraktiv, kleinschrittige Verbesserungen durchzuführen anstatt auf grundsätzliche Änderungen des Antriebskonzeptes zu setzen.

Zu den beteiligten Akteuren im Transformationsfeld zählen neben der Automobilindustrie, ihren Zulieferern und deren Interessenvertretungen auch die Autofahrer und die Mobilitätsverbände sowie die staatliche Verwaltung des KFZ-Verkehrs, z.B. das Kraftfahrtbundesamt.

Als Transformationsansätze für einen wünschenswerten Pfadwechsel in Richtung auf eine umweltverträglichere Automobilität stehen der Elektroantrieb, der Antrieb mit Brennstoffzelle sowie verschiedene Hybridantriebe zur Verfügung.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungs- und Tabellenverzeichnis **V**

Abkürzungsverzeichnis **VI**

1 Ziel und Methodik **7**

2 Transformationsfeld **8**

2.1 PKW-Antriebe 8
2.2 Akteure 9
2.3 Historische Entwicklung 10
2.4 Umweltwirkungen 12

3 Pfadabhängigkeiten **14**

3.1 Charakterisierung der Stärken des etablierten Pfades, 14
3.2 Transformationshemmnisse und Pfadabhängigkeiten 15
3.2.1 Rechtliche Pfadabhängigkeiten 15
3.2.2 Ökonomische Pfadabhängigkeiten 16
3.2.3 Technologische Pfadabhängigkeiten 18
3.2.4 Organisationale Pfadabhängigkeiten 21
3.2.5 Nutzerbezogene Pfadabhängigkeiten 22
3.3 Angriffspunkte und Schwächen des etablierten Pfades 24

4 Transformationsansätze **26**

4.1 PKW mit reinem Elektroantrieb 27
4.2 Elektrofahrzeug mit Range Extender 31
4.3 Brennstoffzellenantrieb 33
4.4 Hybrid-PKW und Plug-in-Hybrid 35
4.5 Beurteilung der Transformationsansätze. 36
4.6 Das Akteurssystem der Transformation 37

5 Fazit und Möglichkeiten für Pfadwechsel **40**

5.1 Pfadabhängigkeiten 40
5.2 Auswirkungen der Pfadabhängigkeiten auf die Transformationsansätze 41
5.3 Erste Handlungsempfehlungen 42

Experteninterviews **45**

Literaturverzeichnis **46**

Abbildungs- und Tabellenverzeichnis

Abbildung 1: Tesla Modell S 8

Abbildung 2: Familienfoto mit Volkswagen, der Autor in blau-weißem Anorak 10

Abbildung 3: Entwicklung des PKW-Bestandes in Deutschland 1960 bis 2016 11

Abbildung 4: Entwicklung des der Treibhausgasemissionen des verarbeitenden Gewerbes, des Energiesektors und des Verkehrs in Deutschland von 1990 bis 2014 12

Abbildung 5: Entwicklung des Erdölpreises 1986 bis 2016 14

Abbildung 6: Weltmarktpreise für Rohöl, Verbraucherpreise für Benzin und Mineralölsteuer 15

Abbildung 7: Kostenstruktur eines Fahrzeugs mit Verbrennungsmotor 17

Abbildung 8: Technologische Schwerpunkte anhand des Anteils transnationaler Patentanmeldungen von ausgewählten Regionen im Vergleich 19

Abbildung 9: Technologische Schwerpunkte anhand des Anteils transnationaler Patentanmeldungen von ausgewählten Staaten im Vergleich 19

Abbildung 10: Produktion von xEV in den Vergleichsregionen nach Herstellern in 2013 20

Abbildung 11: Modal Split in Deutschland, 1976-2011 23

Abbildung 12: Vorstellungen von der Antriebstechnik in 25 Jahren 24

Abbildung 13: Stufen der Elektrifizierung des Antriebsstranges 26

Abbildung 14: Relevanz verschiedener Motive bei der Fahrzeuganschaffung 29

Abbildung 15: Kostenstruktur eines Elektrofahrzeugs 31

Abbildung 16: Klimabilanz für Elektro-PKW und PKW mit Range Extender 32

Abbildung 17: Entwurf eines Liegerades mit Karosserie von ONYX composites GmbH 33

Abbildung 18: Jährliche Verkäufe von Brennstoffzellen PKW und Bussen 34

Abbildung 19: Bestand an Elektromobilen bis 2040 37

Abbildung 20: Gewinner und Verlierer einer Verkehrswende durch alternative PKW-Antriebe 38

Abbildung 21: Pfadwechsel PKW-Antriebe 42

Tabelle 1: Auswirkungen von Pfadabhängigkeiten auf Transformationsansätze 41

Abkürzungsverzeichnis

ADAC	Allgemeiner Deutscher Automobilclub
BEV	batterieelektrisches Fahrzeug
FCV	Brennstoffzellenfahrzeug
GES	Gesellschaft für elektrischen Straßenverkehr
HEV	Hybridfahrzeug
IEA	Internationale Energieagentur
NPE	Nationale Plattform, Elektromobilität
PEV	Plug-in Hybridfahrzeug
VDA	Verband der Automobilindustrie
xEV	alle Bauarten elektrischer Fahrzeuge (BEV, HEV und PEV)

1 Ziel und Methodik

Das Projekt Evolution2Green wird von adelphi gemeinsam mit dem Institut für Zukunftsstudien und Technologiebewertung und dem Borderstep Institut durchgeführt. Gefördert vom Bundesministerium für Bildung und Forschung thematisiert das Vorhaben Transformationspfade hin zu einer Green Economy und die Gestaltung von Pfadwechseln.

Im zweiten Arbeitspaket des Projektes erfolgt die Analyse von 15 durch signifikante Umweltauswirkungen und erhebliche Transformationshemmnisse geprägten, Transformationsfeldern in den Bereichen Mobilität, Energie, Ernährung/Landwirtschaft und Ressourcen[1]. Diese Transformationsfelder werden anhand des im ersten Arbeitspaket entwickelten Modells der evolutorischen Ökonomik (Clausen, 2016) auf Pfadabhängigkeiten untersucht, die einer Transformation zur Green Economy entgegenwirken. Weiter wird ein Überblick über die bekannten Transformationsansätze geschaffen und diese den drei Leistrategien Effizienz, Konsistenz und Suffizienz zugeordnet (Behrendt, Göll & Korte, 2016).

Basis der Problemanalyse sind neben den Vorarbeiten der drei Institute in den jeweiligen Feldern umfangreiche Analysen der Literatur und der verfügbaren Internetquellen. Interviews mit 4 bis 6 ausgewählten Experten, die zum Ziel haben, die Pfadabhängigkeit und deren Faktoren in den einzelnen Themenfeldern (Binnenlogik und -kultur) besser zu verstehen, erweitern die Datengrundlage.

Primäres Ergebnis je Problem- bzw. Transformationsfeld ist eine Beschreibung der Akteure, Kräfte und Sektordynamiken mit ihren jeweiligen Pfadabhängigkeiten. Teil der Studie sind auch die Analyse der bisher konzipierten und erprobten Transformationsansätze sowie erste Hinweise auf politische Gestaltungsmöglichkeiten.

Das vorliegende Papier beschreibt das Transformationsfeld „PKW-Antriebe“.

[1] In die Auswahl der Problemfelder sind sowohl die aus den Indikatoren der nationalen Nachhaltigkeitsstrategie (Bundesregierung 2012) ersichtliche Problemdrücke, als auch Bemühungen zur Herstellung eines Gleichgewichts zwischen verschiedenen Handlungsbereichen, sowie Bezügen zu den Zukunftsherausforderungen Globalisierung und Digitalisierung eingeflossen.

2 Transformationsfeld

2.1 PKW-Antriebe

Das Automobil als Bewegungshilfe hat sich in den letzten ca. 125 Jahren tief in der europäischen Alltagskultur verankert und die Lebensräume fast aller Europäer wie auch die Raum- und Zeitstrukturen grundlegend umgestaltet (Knoflacher, 2014). Die vorliegende Studie geht von den Freiheiten aus, die das Automobil bietet, nämlich die Möglichkeit, interaktiv und dynamisch die Fahrtroute, die Geschwindigkeit, die Ziele und letztlich auch die Mitfahrer selbst zu wählen. Diese Handlungsmöglichkeiten sowie die darauf aufgebauten kulturellen Verhaltensmuster und Mobilitätsbilder werden wohl dazu führen, dass auch eine ernst gemeinte Green Economy es zumindest mittelfristig und mit bisherigen Ansätzen allein nicht schaffen wird, den privaten Autobesitz nennenswert zurückzudrängen. Alternativen sind aus der vorherrschenden Mobilitätssicht betrachtet grundsätzlich mit erheblichen Einschränkungen und unmittelbaren Bequemlichkeitseinbußen im Vergleich zu der Nutzung eines eigenen Automobils verbunden:

- Multimodale Mobilität (hier auch die Kombination von ÖPNV und Bahn) ist mit ständiger Angst verbunden, den Anschluss zu verpassen, und das eigene Gepäck muss immer wieder transportiert und umgeladen werden.
- Carsharing erfordert eine ex-ante Planung von Fahrten zumindest dann, wenn Fahrzeuge genutzt werden sollen, die nicht ständig und in hoher Anzahl auf kurzfristige NutzerInnen warten.
- Fahrradfahren und Zufußgehen erfordern es, die eigene Trägheit zu überwinden und auch bei kaltem oder regnerischem Wetter den privaten Kampf mit Elementen und Hügeln aufzunehmen.

Nachdem in Deutschland gegenwärtig jeder zweite Einwohner über ein eigenes Auto verfügt ist nicht damit zu rechnen, dass diese Zahl mittelfristig und deutlich zurückgehen wird. Damit stellt sich die Herausforderung, genau diese Automobile umwelt- und klimafreundlicher zu gestalten – selbst wenn dies aus der Perspektive des Jahres 2100 als Brückentechnologie erscheinen mag.

Abbildung 1: Tesla Modell S

Quelle: Tesla Deutschland https://www.teslamotors.com/de_DE/presskit#model3

Der Erfolg des Automobils als Transportmittel ist dabei seit über 100 Jahren mit dem Verbrennungsmotor verbunden. Kemp (1994, S. 1027) beschreibt die Verbindung zwischen

Automobil und Verbrennungsmotor sowie der Verfügbarkeit von preiswerten Treibstoffen und Straßen wie folgt:

> For example, the dominance of the internal combustion engine in motor vehicles is strongly related to the improvements in the design of the engine (leading to important improvements in speed, durability, fuel consumption), the cost savings in manufacturing due to large-scale production and learning by doing, advances in material technology, technical advances in machinery and equipment, organizational adaptations in order to produce more efficiently, low fuel prices due to economies of scale and technical progress in petrol production, and the whole network build-up around the internal combustion engine-the distribution of petrol, a road and service infrastructure, training of mechanics, etc.

Die Motorentechnologie spielt also für die Automobilität eine zentrale Rolle. Die Automobilbranche setzte als Zukunftsstrategie in den letzten Jahren auf effizientere Verbrennungsmotoren, was aber mit Blick auf immer leistungsstärkere und schwerere Fahrzeuge letztlich nicht zu einem insgesamt deutlich sinkenden Treibstoffverbrauch führte.

Der hier vorgelegte Bericht fokussiert auf die Transformation der Antriebstechnologie von Automobilen weg vom Verbrennungsmotor und hin zu Elektrofahrzeugen (incl. der Variante Elektrofahrzeuge mit Range Extender), Brennstoffzellenantrieben und Varianten der Hybridantriebe als Übergangstechnologie.[2]

2.2 Akteure

Das Akteursfeld rund um den Verbrennungsmotor ist groß und die Zahl der Akteure, die von einem Systemwechsel betroffen wäre, ist hoch.

Die größte Gruppe im Akteursfeld stellen mit heute ca. 45 Millionen Personen die zum größten Teil privaten Besitzer bzw. Fahrer eines PKW dar. Mit derzeit über 19 Millionen Mitgliedern ist der 1903 gegründete Allgemeine Deutsche Automobil Club e.V. (ADAC) ihre Vertretung und Europas größter Mobilitätsclub. Zwei Drittel der Neuwagen werden an Männer verkauft (Dudenhöffer, 2012). Die Autowelt ist männlich, was auch in Dudenhöffers Titel „Frauen als Neuwagenkäufer“ deutlich wird. Frauen kaufen grundsätzlich eher schwächer motorisierte und kleinere Autos, den höchsten Anteil an Käuferinnen hat das Modell Suzuki Alto mit 62% und die Marke Mini mit 50% (Dudenhöffer, 2012, S. 71).

Im Zentrum der deutschen Automobilbranche stehen die Automobilhersteller mit ihren 447.200 Beschäftigten.[3] In den deutschen Zulieferbetrieben arbeitete 2014 die Zahl von 295.400 Beschäftigten, aber in der Lieferkette einer großen Anzahl von Teilen sind die Lieferketten global und es kommen weitere Unternehmen im Ausland hinzu. Der Verband der Automobilindustrie e.V. vertritt die Branche nach außen. Präsident des Verbandes ist seit 2007 Matthias Wissmann, der 1993 zunächst Bundesminister für Forschung und Technologie und dann von Mai 1993 bis Oktober 1998 Bundesminister für Verkehr war.

[2] Daneben sind als weitere Übergangstechnologie auch die Erdgasantriebe von Bedeutung, werden aber bewusst nicht behandelt, da der Fokus auf klimaneutralen und damit langfristig zukunftsfähigen Lösungen liegen soll. Ebenso wird nicht behandelt die strombasierte Herstellung von Kraftstoffen, da diese aufgrund des niedrigen Wirkungsgrades der Transformation im Wettbewerb mit Batterien unterlegen zu sein scheinen. Die biobasierte Herstellung von Kraftstoffen in großen Mengen scheint unrealistisch, da es am geeigneten Quellen nachwachsender Rohstoffe mangelt.

[3] Vgl. https://www.vda.de/de/services/zahlen-und-daten/zahlen-und-daten-uebersicht.html vom 22.5.2016.

Der Zentralverband Deutsches Kraftfahrzeuggewerbe (ZDK) vertritt die Interessen der 38.500 Kfz-Werkstätten. Seine Mitgliedsbetriebe haben 460.000 Beschäftigte (Wirtschaftsgesellschaft des Kraftfahrzeuggewerbes mbH, 2014, S. 19) und sind sowohl in 237 Innungen und 14 Landesverbänden als auch in 37 Markenverbänden organisiert.[4] Die Betriebe wickeln jährlich 75 Millionen Wartungs- und Serviceaufträge ab (Wirtschaftsgesellschaft des Kraftfahrzeuggewerbes mbH, 2014, S. 8).

Das Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVDI) ist im Kontext des Straßenverkehrs zuständig für den Erwerb des Führerscheins, das Verhalten der Verkehrsteilnehmer, der Zulassung von Fahrzeugen einschließlich der technischen Anforderungen sowie den gewerblichen Personen- und Güterverkehr. Dem Ministerium unterstellt ist das Kraftfahrtbundesamt, dass Typgenehmigungen und die Allgemeine Betriebserlaubnis (national) für Kraftfahrzeuge und Fahrzeugteile erteilt. Weiter führt es das Fahreignungsregister, im Volksmund Verkehrssünderdatei, das Zentrale Fahrzeugregister, das Zentrale Fahrerlaubnisregister und stellt das Zentrale Verkehrs-Informationssystem ZEVIS (Halterdatei) bereit. Auf Grundlage seiner Informationen werden die Kraftfahrzeug-Zulassungsstatistiken erstellt.

2.3 Historische Entwicklung

Das erste Automobil mit Verbrennungsmotor war im Jahre 1886 der Benz Patent-Motorwagen Nummer 1 des deutschen Unternehmers Carl Benz. Bereits in den Jahren vorher gab es eine Reihe von selbst fahrenden Wagen mit Dampf- oder Elektroantrieb und auch in der Zeit vor dem ersten Weltkrieg war der Wettbewerb der Systeme noch offen. Noch im Jahr 1900 wurden in den USA zahlreiche Automobile mit Dampf betrieben, etwa ein Drittel elektrisch[5] und nur ca. 20 Prozent fuhren mit Benzin. Unruh (2000, S. 821) führt den letztlichen Durchbruch des Verbrennungsmotors auf eher kleine Ereignisse zurück: den Abbau von Pferdetränken, aus denen auch Dampfautomobile Wasser entnommen haben und auch ein gewonnenes Rennen pferdeloser Wagen.

Abbildung 2: Familienfoto mit Volkswagen, der Autor in blau-weißem Anorak

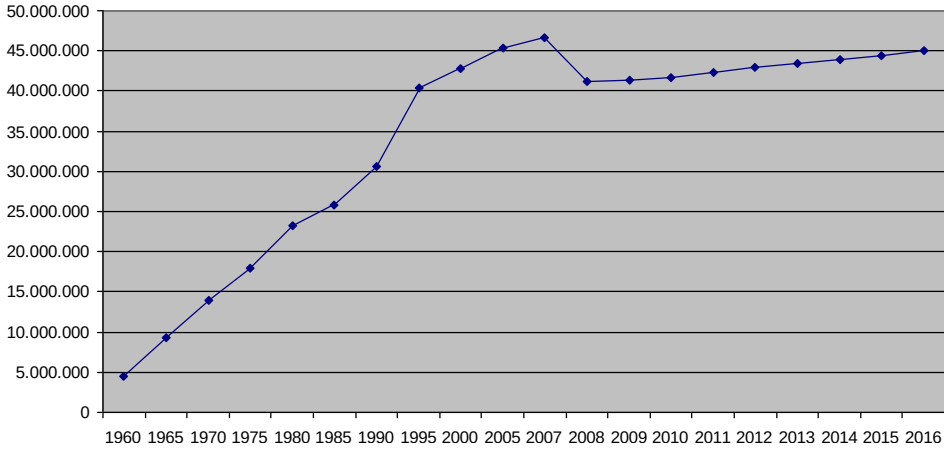
Quelle: Clausen

[4] Vgl. https://www.kfzgewerbe.de/wir-ueber-uns.html vom 22.5.2016.

[5] Vgl. http://energy.gov/articles/history-electric-car vom 23.5.2016.

Bis zum zweiten Weltkrieg blieb in Deutschland die Zahl der Automobile überschaubar. Nach dem zweiten Weltkrieg begann dann aber auch in Deutschland die Massenmotorisierung. Der Volkswagen Käfer stand für die Möglichkeit der breiten Masse, sich ein Auto zu kaufen. Die Statistik des Kraftfahrtbundesamtes zeigt, wie der Automobilbestand von 1960 bis ins Jahr 2016 kontinuierlich zunahm.

Abbildung 3: Entwicklung des PKW-Bestandes in Deutschland 1960 bis 2016



Quelle: Kraftfahrtbundesamt unter http://www.kba.de/DE/Statistik/Fahrzeuge/Bestand/FahrzeugklassenAufbauarten/b_fzkl_zeitreihe.html vom 22.5.2016. Ab 1. Januar 2008 nur noch angemeldete Fahrzeuge ohne vorübergehende Stilllegungen/Außerbetriebsetzungen.

Eine „Sättigung" des Marktes scheint nach wie vor nicht erreicht zu sein. Zwischen 1960 und 1990 nahm der PKW-Bestand um 25 Millionen zu, also etwa um 8 Millionen pro Dekade. Zwischen 2008 und 2016 stieg der Bestand mit ca. 4 Millionen PKWs immer noch mehr als halb so stark.

Schon in den 1970er Jahren wurde an alternativen Antrieben gearbeitet. Die von RWE gegründete „Gesellschaft für elektrischen Straßenverkehr (GES)" testete 30 Elektrotransporter mit Bleibatterien sowie Busse mit Hybridantrieb (Bundesverband der Deutschen Industrie, 1978, S. 76). Die GES prognostiziertem, dass im Jahre 2000 bereits 30% aller Fahrzeuge elektrisch betrieben werden würden (Busse, 1980, S. 152).

Bei den Antrieben dominierte aber bis weit in die 1990er Jahre der Benzinmotor. Der Dieselanteil lag noch 1997 unter 15%, stieg dann aber bis 2007 auf 47% der Neuzulassungen. Nach einem durch die Abwrackprämie verursachten Einbruch stieg der Dieselanteil wieder auf 48%. Es verwirrt, dass dieser Anteil auch ein Jahr nach dem Abgasskandal immer noch weitgehend stabil bei 45% liegt.[6]

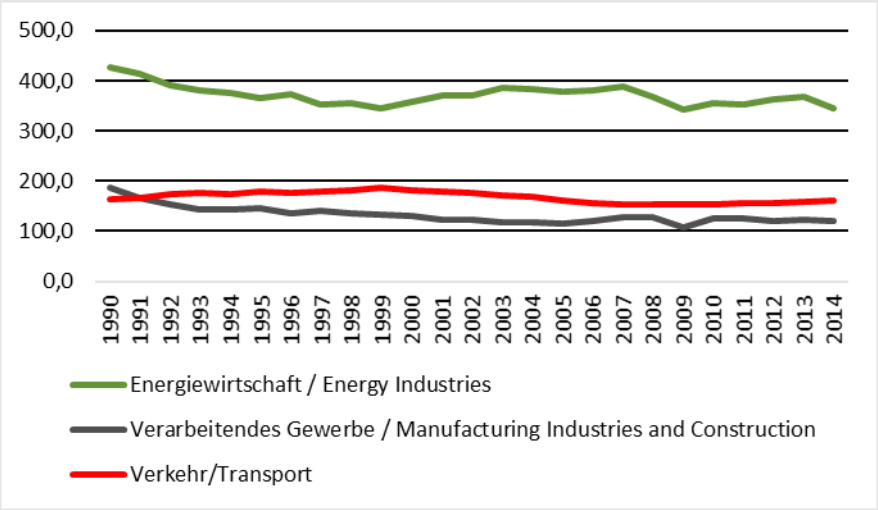
Unter den 245.076 im August 2016 neu zugelassenen Personenkraftwagen waren weiter 3.927 neu zugelassene Hybrid-Pkw (darunter 836 Plug-in-Hybride) sowie 895 Elektro-Pkw. An den PKW mit Hybridantrieb haben nach einer Analyse von Dudenhöffer (2013, S. 3) die japanischen Hersteller Toyota und Lexus einen Anteil von 79,9%, alle deutschen Hersteller (Audi, BMW, Mercedes, Porsche, VW) zusammen einen Anteil von 11,%, worin Dudenhöffer einen massiven Technologie-Nachteil der zu spät eingestiegenen heimischen Hersteller sieht.

[6] Vgl. http://www.kba.de/DE/Presse/Pressemitteilungen/2016/Fahrzeugzulassungen/pm25_2016_n_08_16_pm_komplett.html?nn=716864 vom 16.9.2016.

2.4 Umweltwirkungen

Der PKW-Verkehr ist mit vielfältigen Umweltwirkungen verbunden, von denen zumindest die Treibhauswirkungen, die NO_x-Emissionen, die Feinstaubbelastung wie auch die Lärmemissionen bei Geschwindigkeiten bis zu ca. 50 km/h auf den Einsatz von Verbrennungsmotoren als Antriebstechnologie zurückzuführen sind. Andere Wirkungen, wie z.B. die Flächenzerschneidung durch Straßen oder Roll- und Windgeräusche bei höheren Geschwindigkeiten, sind nicht von der Antriebstechnologie abhängig.

Abbildung 4: Entwicklung des der Treibhausgasemissionen des verarbeitenden Gewerbes, des Energiesektors und des Verkehrs in Deutschland von 1990 bis 2014



Quelle: Umweltbundesamt

Die Treibhausgasemissionen des Verkehrs sind eine erhebliche umweltpolitische Herausforderung.[7] So sanken z.B. die Emissionen des verarbeitenden Gewerbes bezogen auf das Jahr 1990 bis zum Jahr 2000 auf 69% und danach bis 2014 weiter auf 64%. Auch die Energiewirtschaft erreichte in 2000 einen Indexwert von 84% und 2014 einen von 81%. Die Treibhausgasemissionen des Verkehrs stiegen dagegen bis 2000 auf 111% und sanken seither auf 98% des Wertes von 1990 ab.

Es gibt über CO_2 hinaus vielfältige Luftemissionen aus Verbrennungsmotoren. Gemessen am jeweiligen Anteil an den nationalen Emissionen sind die NO_x-Emissionen und die Feinstaubemissionen von besonderer Bedeutung.

Nach Angaben des Umweltbundesamtes gehen etwa 491.000 Tonnen (40%) der deutschen NO_x-Emissionen auf den Verkehr zurück, mit Abstand die größte Quelle.[8] Nun wurden in den letzten Jahren in verschiedenen Untersuchungen auffällig hohe NOx-Werte bei Dieselfahrzeugen wegen einer großzügigen Auslegung des sogenannten „Thermofensters“ sowie anderer Betriebszustände, in denen die Abgasreinigung abgeschaltet wurde, festgestellt. Im Falle Opel berichtet der Spiegel (Becker, Hawranek, Knaup & Müller, 2016) darüber, dass die Abgasreinigung bei Temperaturen unter 17°C und über 33°C abschaltet (der Test findet

[7] Alle folgenden Daten wie auch die Grafik auf Basis von https://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/klimaschutz-energiepolitik-in-deutschland/treibhausgas-emissionen/emissionsquellen vom 23.5.2016.

[8] Vgl. https://www.umweltbundesamt.de/themen/luft/emissionen-von-luftschadstoffen/quellen-der-luftschadstoffe vom 23.5.2016.

bei 20°C bis 30°C statt). Weiter schaltet die Abgasreinigung bei 145 km/h ab (der Test findet bei Geschwindigkeiten bis 120 km/h statt). Eine dritte Abschaltung erfolgt bei 2.400 U/min, der Test findet bei Umdrehungszahlen bis 2.200 U/min statt. Bei FIAT gibt es Motoren, die die Abgasreinigung nach 22 Minuten Betrieb abschalten: der Test dauert 20 Minuten. Die Autohersteller Audi, Porsche, Mercedes, Volkswagen und Opel rufen gegenwärtig noch freiwillig insgesamt 630.000 Fahrzeuge in die Werkstatt zurück (Breitlinger, 2016). In der Konsequenz deutet vieles darauf hin, dass die NO_x-Emissionen aus dem Verkehr (mit Fokus auf den Anteil der Diesel PKW) auch deutlich höher sein könnten, als vom Umweltbundesamt auf Basis der offiziellen Messwerte errechnet.

Auch die Feinstaubemissionen der Diesel PKW sind umweltpolitisch von Bedeutung. Der Verkehrssektor emittiert 23.800 Tonnen „lungengängigen Feinstaub $PM_{2,5}$ (23%) und ist auch hier eine der drei bedeutendsten Quellen.

Weiter beeinträchtigt Verkehrslärm das Leben vieler Menschen. 54% fühlen sich vom Straßenverkehrslärm gestört. Mit dem „Nationalen Verkehrslärmschutzpaket II“ bemüht sich die Regierung um Begrenzung der Zahl der Lärmgeschädigten (Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS), 2009). Im Zentrum des Paketes stehen Maßnahmen zu Geräuschgrenzwerten für Kraftfahrzeuge und speziell für Reifen, die Lärmsanierung an Bundesfernstraßen, der Bau von Ortsumgehungen sowie die Aktualisierung des Lärmberechnungsverfahrens. Weitere Aktivitäten fokussieren auf den Lärmschutz im städtischen Verkehr.

3 Pfadabhängigkeiten

3.1 Charakterisierung der Stärken des etablierten Pfades,

Zunächst einmal besteht die Stärke des etablierten Pfades darin, die Massenmobilisierung mit Hilfe des Automobils ermöglicht und seit gut 50 Jahren aufrechterhalten zu haben. Der PKW-Bestand in Deutschland ist dabei kontinuierlich auf heute ca. 45 Millionen PKW gestiegen.

Durch immer sicherere Automobile gelang es in Deutschland, die Zahl der Unfalltoten von ihrem Höchststand in 1970 mit über 20.000 Toten p.a. bis 2010 auf ihr heutiges Niveau von ca. 3.500 Verkehrstoten p.a. zu senken.[9]

Der Verbrennungsmotor ermöglicht es dabei, große und komfortable Autos mit hohen Geschwindigkeiten und großer Reichweite zu bauen (Rennreiselimousinen), die spontane Fahrten uneingeschränkt ermöglichen. Die Autoindustrie gelang es, das Erlebnis der „Freude am Fahren“ in den Köpfen sehr vieler Bürgerinnen und Bürger stabil als erstrebenswert zu verankern.

Eine weitere, sehr zentrale Stärke des etablierten Pfades besteht darin, die Kraftstoffversorgung langfristig zu sehr günstigen Preisen sicherzustellen. Nachdem das hohe Preisniveau der letzten zehn Jahre überwunden scheint, steht der Energiepreis der weiteren Nutzung von Benzin- und Dieselfahrzeugen bis auf weiteres nicht mehr im Wege.[10]

Abbildung 5: Entwicklung des Erdölpreises 1986 bis 2016

Quelle: http://www.indexmundi.com/commodities/?commodity=crude-oil-brent&months=360 vom 17.9.2016

[9] Vgl. https://www.destatis.de/DE/PresseService/Presse/Pressemitteilungen/2016/02/PD16_060_46241.html;jsessionid=2CC95EBD7AD56093D642A9DBB2E4E9CD.cae1 vom 23.5.2016.

[10] Angesichts der Instabilität in vielen Lieferländern (mittelerer Osten, Venezuela etc.) ist aber auch denkbar, dass der Ölpreis wieder steigt.

3.2 Transformationshemmnisse und Pfadabhängigkeiten

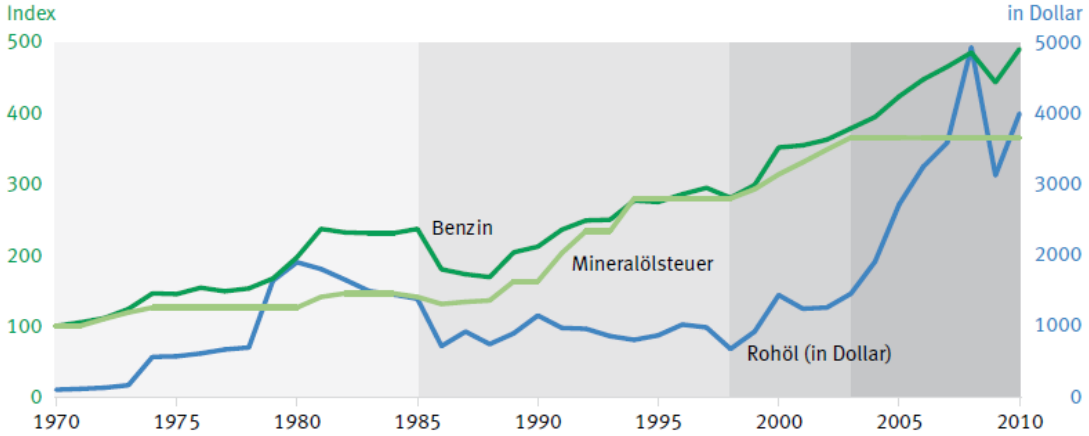
Durch eine Reihe von Pfadabhängigkeiten wird die Transformation der Antriebstechnologie der PKWs hin zu umweltfreundlicheren Technologien gehemmt.

3.2.1 Rechtliche Pfadabhängigkeiten

Der PKW ist durch eine Reihe von rechtlichen Regelungen wie z.B. die Stellplatzverordnungen, das Dienstwagenprivileg oder steuerliche Vorschriften in die Gesellschaft integriert. Diese und andere Regelungen festigen zwar nur bedingt die Stellung des Verbrennungsmotors, es gelingt aber auch einigen transformativen Regeln zu Kraftstoffpreis und Schadstoffausstoß bisher nicht, seine Stellung spürbar zu erschüttern.

Durch die Mineralölsteuer wurden in den letzten 45 Jahren Benzin und Diesel in zwei Zeiträumen teurer gemacht. Die erste Periode der Steuererhöhungen geht auf die Jahre 1990 bis 1995 nach der Wiedervereinigung zurück, die zweite Periode liegt in der Zeit der Rot-Grünen Koalition von 1999 bis 2004 und zeigte sich in der ökologischen Steuerreform. Seit dem Jahr 2003 wurde der Steuersatz jedoch nicht mehr erhöht. Ein Anreiz zum Wechsel auf effizientere, sparsamere oder gar andere Antriebe geht vom derzeitigen Kraftstoffpreisniveau nicht aus.

Abbildung 6: Weltmarktpreise für Rohöl, Verbraucherpreise für Benzin und Mineralölsteuer



Rohölpreisindex in Dollarnotierung des Hamburgischen WeltWirtschaftsInstituts (HWWI), Verbraucherpreisindex für Normal- und Superbenzin, Entwicklung der Mineralölsteuer je Liter Benzin bleifrei.
100=Rohöl- und Benzinpreisniveau sowie Mineralölsteuerbelastung im Jahr 1970

Quelle: Statistisches Bundesamt (2011, S. 14)

In den 1990er Jahren vertraute die EU-Kommission zur Reduzierung des CO_2-Ausstosses neuer Pkw zunächst auf das Instrument der freiwilligen Selbstverpflichtung: Die europäische Automobilindustrie hatte sich 1998 gegenüber der EU-Kommission u.a. dazu verpflichtet, den durchschnittlichen CO_2-Ausstoß neuer Pkw auf 140 g/km bis zum Jahr 2008/09 zu senken. 2008 lagen die durchschnittlichen CO_2-Emissionen von Neuwagen in der EU aber erst bei 157 g/km. Die Deutsche Bank resümiert: *„Für die Zielverfehlung zeichnet in erster Linie die Automobilindustrie selbst verantwortlich, denn sie hat den größten Einfluss auf die Ent-*

wicklung und den Einsatz effizienterer Motoren, neuer Antriebstechnologien oder leichterer Materialien im Fahrzeugbau" (Deutsche Bank Research, 2009, S. 3).[11]

Im Dezember 2008 haben sich Rat und Parlament der EU auf eine Verordnung zur Minderung der CO_2 - Emissionen bei neuen PKW geeinigt. Das neue Ziel für 2015 waren nun 130 g/km. Für die durchschnittlichen Emissionen eines in 2014 verkauften Fahrzeugs gibt die EU-Kommission[12] 123,4 g CO2/km an, womit das Ziel für 2015 erreicht ist. Seit das Monitoring in 2010 begonnen wurde, entspricht dies einer Reduktion von 17g oder 12%.

Die an sich erfreuliche Zielerreichung stellt sich differenzierter dar, wenn man parallel auf die zunehmende Differenz von Herstellerangaben und den daraus errechneten Werten der CO_2-Emissionen einerseits und der realen Kraftstoffverbräuche andererseits schaut. Nach einer Studie des US-amerikanischen International Council on Clean Transportation (ICCT, TNO, IFEU & Sidekick, 2013) betrug diese Differenz bei im Jahre 2011 ausgelieferten Neufahrzeugen deutscher Hersteller durchschnittlich 23 Prozent. Die Tendenz dieser Diskrepanz weist seit Anfang des Jahrtausends nach oben: „… the average discrepancy between fuel consumption (and, by extension, CO_2 emission) values reported in spritmonitor.de and manufacturers' type-approval values increased from 7 percent in 2001 to 13 percent in 2007 and then jumped to 23 percent by 2011 (ICCT et al., 2013, S. 6). Die Tendenz weist weiter nach oben. Die Deutsche Umwelthilfe (2013) listet sorgfältig 20 Möglichkeiten auf, am Verbrauchswert durch Veränderung bzw. Optimierung von Fahrzeug, Motor und Testanlage zu feilen. Die hierbei erzielten Erfolge scheinen einen erheblichen Teil der gegenüber der EU bestehenden Reduktionsverpflichtungen zu erklären. Den 21% Senkung der CO_2-Emissionen von 2008 bis 2014 (von 157 g/km auf 123,4 g/km) stehen also zusätzliche Messabweichungen von ca. 10% allein zwischen 2007 und 2011 gegenüber, die die Hälfte des erreichten Effekts ausmachen.

Eine ähnliche rechtliche Problematik erwächst offensichtlich aus der exakten Festlegung der Prüfbedingungen für die Ermittlung des NO_x-Schadstoffausstoßes. Auch diese wird von der Automobilindustrie zumindest bei Dieselantrieben phantasievoll genutzt, um das Zielviereck „zulässiger Schadstoffausstoß unter Prüfbedingungen", „Verbrauch an Ad-Blue", „Verbrauch an Diesel" und „Motorleistung" in ein für den Autoabsatz komfortables Gleichgewicht zu bringen (Becker et al., 2016; Breitlinger, 2016).

3.2.2 **Ökonomische Pfadabhängigkeiten**

Deutschland ist eines der führenden Länder der Automobilproduktion. In der Zahl der produzierten PKW liegt Deutschland nach Zahlen des VDA mit 5,6 Millionen hinter China (18,6 Mil.), den USA (11,4 Mil.) und Japan (8,3 Mil.) an vierter Stelle.[13]

Die Fabriken der Automobilhersteller mit ihren 447.200 Beschäftigten und der Zulieferbetriebe mit weiteren 295.400 Beschäftigten[14] repräsentieren erhebliche Werte. Sechs der Automobilunternehmen gehören zu den 100 größten deutschen Unternehmen und ihre Marktkapitalisierung beträgt ca. 280 Milliarden €, die deutsche Wirtschaftsbranche mit dem höchsten Börsenwert (während die Autobranche in Europa nur auf Rang sieben rangiert) (Pricewaterhouse Coopers, 2014, S. 14).

[11] Die Effektivität von Selbstverpflichtungen wird aufgrund fehlender Sanktionsmechanismen schon lange bezweifelt (Clausen, Brokmann & Schellenberger, 1995).

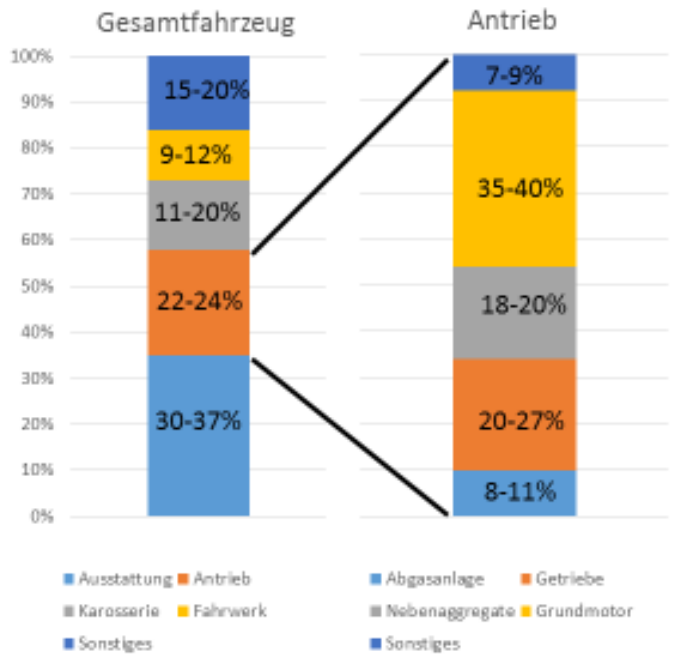
[12] vgl. http://ec.europa.eu/clima/policies/transport/vehicles/cars/index_en.htm vom 30.8.2015.

[13] Vgl. https://www.vda.de/de/services/zahlen-und-daten/jahreszahlen/automobilproduktion.html vom 24.5.2016.

[14] Vgl. https://www.vda.de/de/services/zahlen-und-daten/zahlen-und-daten-uebersicht.html vom 22.5.2016.

Ein hoher Anteil des Umsatzes der Zulieferbetriebe wird mit Bauteilen für den Antriebsstrang für Fahrzeuge mit Verbrennungsmotor erzielt. Die Kosten für den Antrieb machen ca. 22 bis 24% der Gesamtkosten des Fahrzeugs aus und verteilen sich wie in der folgende Grafik dargestellt.

Abbildung 7: Kostenstruktur eines Fahrzeugs mit Verbrennungsmotor



Quelle: aus Basis von Kampker et al. (2013, S. 47)

Alle diese Teile und die von ihnen repräsentierten Werte sind ausschließlich für Autos mit Verbrennungsmotoren erforderlich.[15]

Die deutsche Automobilindustrie ist international gerade im margenstarken Premiumsegment gut aufgestellt (Büro für Technikfolgenabschaetzung beim Deutschen Bundestag (Hrsg.), 2012, S. 13). Grundsätzlich gilt, dass mit hochpreisigen Automobilen (Mittel- und Oberklasse und viele SUV) mehr verdient werden kann als mit den preiswerten Modellen – was den Anreiz zum Verkauf von Wagen mit kleiner Motorisierung oder wenig Zusatzausstattung wie z.B. Klimaanlagen begrenzt.

Hohe für die Transformation zur Green Economy bedeutende Subventionen fließen in den Verkehrssektor, insgesamt 24.168 Mio. € (Umweltbundesamt (Hrsg.), 2014, S. 63). Die größten Posten sind hier die Energiesteuervergünstigung für Dieselkraftstoff in Höhe von 7.050 Mio. € und die Entfernungspauschale des Einkommenssteuerrechts in Höhe von 5.000 Mio. €, Auch die pauschale Besteuerung privat genutzter und deutlich überdurchschnittlich motorisierter Dienstwagen (Klimaallianz Deutschland, 2012) in Höhe von min. 500 Mio. € ist aufzuführen. Alle diese Subventionen wirken pfadstabilisierend für PKWs mit Verbrennungsmotor: die Energiesteuervergünstigung für Dieselkraftstoff sowieso, aber auch die

[15] Bei Elektrofahrzeugen gilt eine völlig andere Kostenverteilung, die für die nächsten Jahre noch durch die sehr teure Batterie dominiert wird (vgl. Abschnitt 4.1).

Entfernungspauschale sowie die pauschale Besteuerung privat genutzter Dienstwagen, durch die zumindest der Kauf vergleichsweise teurer und verbrauchsintensiver Fahrzeuge angereizt wird.

Die hohe Mobilität hat nicht zuletzt aufgrund der vielen PKW ihren Preis: Flossen 1970 noch 12,5% der Konsumausgaben privater Haushalte in den Verkehr, so waren es 1990 schon 20,3% und 2010 24,9%.[16] Parallel sanken die Ausgaben für Nahrungsmittel, Getränke und Tabakwaren von 24,5% in 1970 auf 13,5% in 2010. Die Zahlungsbereitschaft für die gegenwärtige Mobilität ist stetig gewachsen und ist heute auf hohem Niveau vorhanden.

3.2.3 Technologische Pfadabhängigkeiten

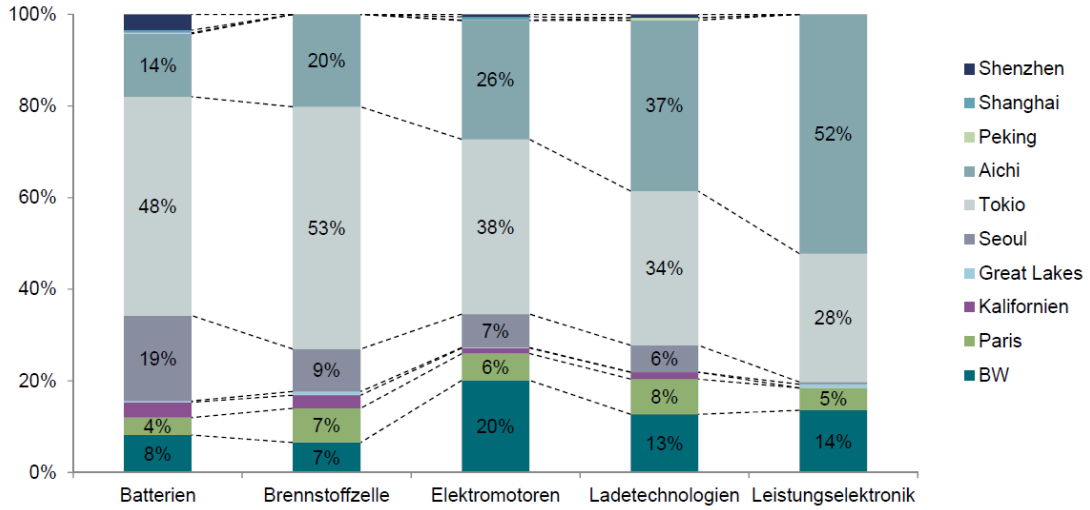
Eine vergleichsweise hohe Zahl F&E intensiver Komponenten im Automobilbau ist für den Bau einer Verbrennungskraftmaschine erforderlich. Hierzu gehören der Motoblock selbst mit Kolben, Dichtungen, Ventilen, Nockenwelle, Ölwanne, Ölfilter u.a.m., aber auch die Einspritzanlage, das Abgassystem mit dem Katalysator, der Tank, die Kupplung sowie Nebenaggregate wie Ölpumpe, Turbolader und Lichtmaschine. Pfäfflin (2015, S. 18) schätzt in einer für die Hans-Böckler Stiftung erstellten Studie allein in der Metropolregion Nürnberg den Kern des Automotive-Clusters auf 70.000 Beschäftige, von denen 25.000 in Betrieben arbeiten, die nur Teile des klassischen Antriebsstranges produzieren. Im Falle eines wirklichen Markterfolgs der Elektromobilität hätten diese Unternehmen mit einem Wegbrechen des Marktes zu kämpfen.

Weitere technologische Risiken bestehen für das Gewerbe des Kraftfahrzeughandwerks. Aufgrund der vielen durch einen Systemwechsel wegfallenden reparaturanfälligen Teile des Verbrennungsmotors und den vermuteten langen Lebensdauern der Hauptelemente des Elektroantriebs sinken die Volumina der Wartungsarbeiten bei BEV im Vergleich zu Verbrennungsmotoren gravierend (e-mobil bw (Hrsg.), 2014, S. 16). Die Arbeitszeitwerte gehen aufgrund einer geringeren Häufigkeit von Reparaturen um ca. 13% zurück (e-mobil bw (Hrsg.), 2014, S. 24), der Teileumsatz gar um über 70% (e-mobil bw (Hrsg.), 2014, S. 31). Insgesamt erwartet die Studie einen Rückgang des Werkstattumsatzes von über 40% für batterieelektrische Fahrzeuge im Vergleich zu Benzin- und Dieselmotoren (e-mobil bw (Hrsg.), 2014, S. 29).

Wie groß die Gefahr ist, das die deutsche Automobilbranche aufgrund eines technischen Strukturwandels international abgehängt wird, wird aus Analysen des Fraunhofer ISI (e-mobil bw (Hrsg.), 2015; Zanker, 2015) deutlich. Betrachtet werden in dieser Studie Hybrid Electric Vehicles (HEV, deutsch: Hybridfahrzeug), Plug-in-Hybrid Vehicles (PHEV, deutsch: Plug-in Hybridfahrzeug), Battery Electric Vehicles (BEV, deutsch: batterieelektrisches Fahrzeug) (gemeinsam als xEV bezeichnet) und Fuel Cell Vehicles (FCV, deutsch: Brennstoffzellenfahrzeug). Die in der folgenden Grafik gezeigte Analyse der Patentanmeldungen basiert auf den Anmeldungen internationaler Patente in den Jahren 2009 bis 2011 (e-mobil bw (Hrsg.), 2015, S. 19).

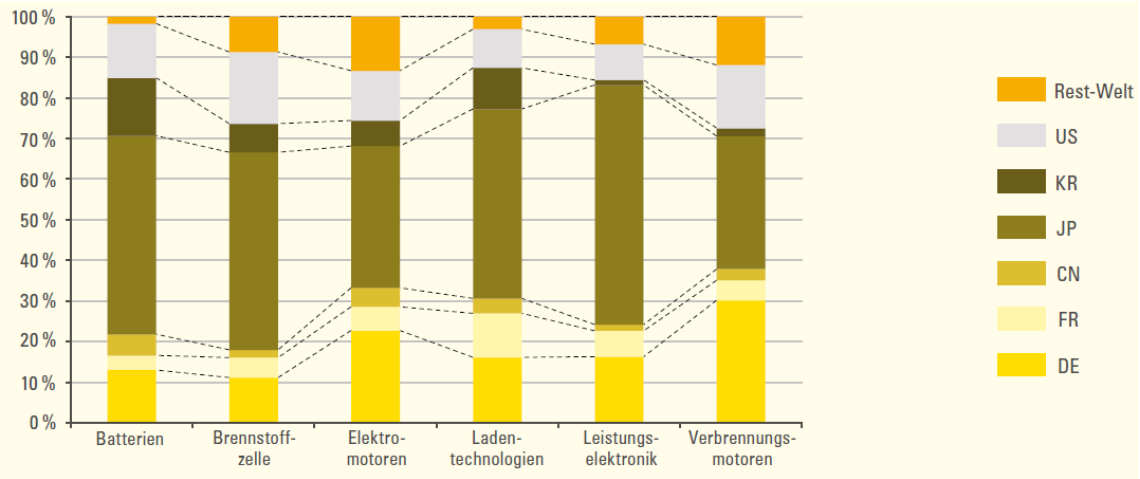
[16] Vgl. https://www.destatis.de/DE/ZahlenFakten/Indikatoren/LangeReihen/LebensunterhaltKonsum/Irleb03.html vom 23.5.2016.

Abbildung 8: Technologische Schwerpunkte anhand des Anteils transnationaler Patentanmeldungen von ausgewählten Regionen im Vergleich



Quelle: Zanker (2015, S. 5)

Abbildung 9: Technologische Schwerpunkte anhand des Anteils transnationaler Patentanmeldungen von ausgewählten Staaten im Vergleich



Quelle: e-mobil bw (2015, S. 19).

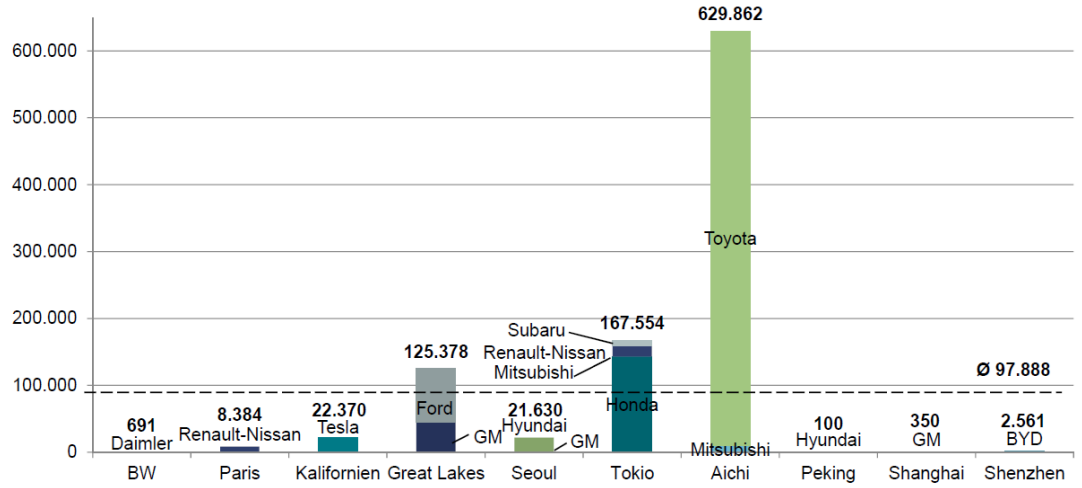
Die Dominanz der beiden japanischen Regionen Aichi und Tokio (im Vergleich der Regionen) schwankt zwischen 64% bei Patenten zu Elektromotoren und 80% bei Patenten für Komponenten der Leistungselektronik und erstreckt sich über die gesamte Breite der Technologien für batterieelektrische Fahrzeuge wie auch Brennstoffzellenfahrzeuge. Im Vergleich der Staaten meldeten Japan und Korea 2009 bis 2011 zwischen 40% (Elektromotoren) und 60% (Leistungselektronik und Batterien) der transnationalen Patente an. Deutschland kann nur in einer Kategorie mit Japan gleichziehen: dem Verbrennungsmotor.

Dabei hilft es auch wenig, dass sich im Vergleich zu den Jahren 1990 bis 1994 die Zahl der deutschen Patente in den Jahren 2008 bis 2012 deutlich erhöht hat. Über alle Umwelttechnologien hinweg liegt die Zahl der Patentanmeldungen aktuell um den Faktor 2,4 höher als zu Beginn der 1990er Jahre, bei Verbrennungsmotoren um den Faktor 2,6, bei der mobilen Brennstoffzelle um den Faktor 8,0 und bei Elektroantrieben um den Faktor 12,0 (Clausen & Gandenberger, 2016). Ein Interviewpartner wies darauf hin, dass Deutschland früher in der

Batterieforschung führend war. Aber ab den 1980er Jahren galten Batterien als „schmutzige Technologie“, die dann letztlich abwanderte. Die Hochschullehrstühle der Batterietechnik wurden komplett umgewidmet.

Versteht man Innovation als „Entwicklung und Durchsetzung“ einer neuartigen Lösung (Fichter & Clausen, 2013, S. 34), dann spiegelt zwar die Zahl der Patente die Anstrengungen der Entwicklung, gibt aber an sich noch keinen Hinweis auf die Durchsetzung. Diese spiegelt sich eher in den realen Produktionszahlen, die aber ein sehr ähnliches Bild abgeben.

Abbildung 10: Produktion von xEV in den Vergleichsregionen nach Herstellern in 2013



Quelle: Zanker (2015, S. 9)

Seit 2014 entsteht in der Wüste Nevadas die sogenannte Gigafactory von Tesla. Hier sollen auf 500.000 m^2 Produktionsfläche und mit 6.500 High-Tech Jobs ab 2020 jährlich 35 GWh Lithium-Ionen Akkus für die Großserienproduktion von Tesla hergestellt werden.[17] Mit dem Serienanlauf des Tesla Modell 3 soll die Gigafactory 2017 die Produktion aufnehmen.[18] Bis zum 15. Mai 2016 lagen sechs Wochen nach der Vorstellung des Tesla Modell 3 stolze 373.000 Bestellungen vor. Geplant ist eine Jahresproduktion von 500.000 Wagen, mit denen Kalifornien ab 2018 mit der Region Aichi gleichziehen würde. Sowohl Kalifornien wie auch Aichi würden dann ca. 700 mal mehr xEV bauen als Baden-Württemberg in 2013.

Eine vergleichsweise weniger bedeutende Pfadabhängigkeit scheint dagegen die Ladetechnik für Elektromobile zu sein. Tesla hat für seine Kunden bereits ca. 60 „Supercharger“[19] mit jeweils mehreren Ladeplätzen an deutschen Autobahnen aufgestellt und sieht das Herstellerversprechen, mit Hilfe der Supercharger auch Langstrecken fahren zu können, als wesentliches Teil des Produktpaketes. Die Nationale Plattform Elektromobilität (NPE) informiert: „Wer lange Strecken fährt, lädt unterwegs an derzeit gut 5.800 öffentlich zugänglichen Ladepunkten, davon 150 Schnellladepunkte (Stand: Dezember 2015). Das Bundesverkehrsministerium hat mit der Autobahn Tank & Rast GmbH vereinbart, alle ihrer rund 400 eigenen Raststätten an Bundesautobahnen mit Schnellladesäulen und Parkplätzen für Elektrofahrzeuge auszustatten“ formuliert die Nationale Plattform Elektromobilität, die für das Jahr 2020 einen Bedarf von 70.000 öffentlichen Ladepunkten und 7.100 Schnellladesäulen ermit-

[17] Vgl. https://www.teslamotors.com/de_DE/gigafactory vom 24.5.2016. Die 35 GWh sind deutlich mehr als die Weltjahresproduktion 2013.

[18] Vgl. http://www.businessinsider.de/tesla-spektakulaere-aufnahmen-von-elon-musks-gigafactory-2016-4 vom 24.5.2016.

[19] Vgl. https://www.tesla.com/de_DE/findus/list/superchargers/Germany vom 2.8.2016.

telt hat.[20] Ein Interviewpartner erwähnte die Problematik, dass für die Energieversorger noch kein übertragbares Geschäftsmodell entwickelt wurde, mit dem die aufwendigen Säulen mit geringem Tagesumsatz wirtschaftlich betrieben werden können.

Für die meisten E-Mobile gibt es auch eine private Lademöglichkeit, wobei aber auch hier Bewohner von Mehrfamilienhäusern nicht nur Probleme haben, wenn sie „Laternenparker" sind, sondern aus Sicht eines Interviewpartners auch, wenn in einer gemeinschaftlich genutzten Tiefgarage ein Ladeplatz installiert werden soll.

Das Laden von E-Mobilen wurde bisher durch unterschiedliche Ladetechniken kompliziert.[21] Am 10.3.2016 trat die Ladesäulenverordnung in Kraft (Bundesministerium für Wirtschaft und Energie, 2016). Hintergrund ist das europäische Ziel der Schaffung einer einheitlichen und standardisierten Lade-Infrastruktur. Die Verordnung macht den Stecker Typ 2 nach DIN EN 62196-2 bzw. Combo 2 DIN EN 62196-3 zum verpflichtenden Standard.

3.2.4 Organisationale Pfadabhängigkeiten

Die deutschen Automobilhersteller wie auch ein großer Anteil der Zulieferbetriebe und letztlich auch das deutsche Kraftfahrzeuggewerbe (ZDK) sind auf die Entwicklung, den Bau und die Wartung von PKW mit Verbrennungskraftmaschinen spezialisiert. In der Gedankenwelt der erfahrenen Manager und Vorstände gibt es, so ein Interviewpartner, kaum etwas anderes als Benziner und Diesel, mit jungen Managern sei da der Gedankenaustausch offener. Auch die Frage der Ladeinfrastrukturen mitzudenken macht den deutschen Herstellern aus Sicht eines Interviewpartners Probleme, da man sich als Automobilhersteller und nicht als Tankstellenbetreiber verstehe.

Pfäfflin (2015, S. 20) berichtet von einer im Auftrag der IHKs in der Region Stuttgart beauftragten Befragung von ca. 100 Zulieferbetrieben aus 2010:

> Danach sind circa zwei Drittel der baden-württembergischen Zulieferer der Automobilindustrie der Ansicht, dass die durch die Elektromobilität eventuell auf sie zu kommende Veränderungen es nicht rechtfertigen, sich intensiver mit dieser Materie zu beschäftigen. Umgekehrt setzen sich v.a. die großen Zulieferer und die Tier-1-Zulieferer intensiv mit dem Thema E-Mobility auseinander.
>
> Hinsichtlich der Wirkungen auf den eigenen Betrieb, sehen v. a. 46% der weniger informierten, kleinen Zulieferer keine Auswirkungen, bei den Großen sind es nur 5%. Die Autoren vermuten, dass mit wachsender Verfolgung der Diskussion rund um neue Antriebe für Automobile die Einschätzung sinkt, nicht betroffen zu sein.

Pfäfflin (2015, S. 35) sieht die deutliche Gefahr, die Risiken des Strukturwandels – auch auf Betriebsratsseite - zu unterschätzen.

Große Zulieferer wie Bosch haben zudem in der Grünstrombranche bereits leidvolle Erfahrungen gesammelt. Von 2009 bis 2014 war man Eigentümer von aleo-solar, eine verlustreiche Episode für Bosch. Daimler Benz hat sich zusammen mit Evonik bereits im Joint-venture LiTec an der Zellherstellung versucht, ist damit aus Sicht eines Interviewpartners aber gescheitert, was einen Neuanfang in der Branche schwierig macht.

Es ist daher kein Zufall, dass die Autoindustrie ihre Interessen an der Aufrechterhaltung des Benzin-Diesel-Pfades auch im politischen Umfeld machtvoll vertritt. Im Bericht „Lobbying in

[20] Vgl. http://nationale-plattform-elektromobilitaet.de/themen/ladeinfrastruktur/#tabs vom 24.5.2016.

[21] Einen Überblick bietet Wikipedia unter https://de.wikipedia.org/wiki/Stromtankstelle vom 24.5.2016.

Deutschland“ von Transparency International ist daher sowohl den Aktivitäten zur Gestaltung der PKW-Energieverbrauchskennzeichnungsverordnung (2014, S. 30) wie auch den Parteispenden der Autobranche (2014, S. 34) detaillierte Analysen gewidmet.

Der Lobbyreport von Lobby Control (2013, S. 16) berichtet vom Fall des Staatsministers Eckart von Klaeden, der Ende Mai 2013 ankündigte, dass er zum Jahresende zur Daimler AG gehen werde. „Besondere Brisanz erhält der Fall dadurch, dass von Klaeden seine Jobverhandlungen offensichtlich im Amt geführt hat und auch nach der Ankündigung seines Seitenwechsels weiter für die Bundesregierung arbeiten will. Die Rede von „Daimler-Benz am Kabinettstisch“ machte die Runde“ (Lobby Control, 2013, S. 16). Mit Matthias Wissmann steht seit 2007 bereits ein ehemaliger Minister dem VDA als Präsident vor.

Ebenfalls von Bedeutung für den Pfadwechsel mag sein, dass Autoverkäufer zu wenig über Elektroautos wissen (Bittmann, 2014). Die Zeitschrift „Vertriebsmanager“ stellt fest: „Dass es vielen Autoverkäufern noch an Fachwissen und Begeisterung mangelt, könnte auch daran liegen, dass es bislang oftmals keine entsprechenden Trainings-Angebote für sie gibt. Was für Hersteller bei der Einführung neuer Autos mit Verbrennungsmotor ganz normal ist, muss sich offenbar im Falle der Elektroautos erst noch durchsetzen “ (Bittmann, 2014).

Eine weitere organisationale Pfadabhängigkeit könnte darin liegen, dass die Heimladestation nicht als Teil des Autokaufs mitverkauft wird und sich der regionale Elektriker mit der Installation solcher Geräte nicht auskennt.[22]

Wirtschaftsministerium wie auch Automobilforschung müssen sich offenbar ebenfalls erst an den Gedanken des BEV gewöhnen. Das BEV im Szenariomix der vom BMWi beauftragten Studie: „CO2-Emissionsreduktion bei Pkw und leichten Nutzfahrzeugen nach 2020“ (Institut für Kraftfahrzeuge Strategie und Beratung RWTH Aachen, 2014) kaum eine Rolle spielen ist kaum anders zu erklären.[23]

3.2.5 **Nutzerbezogene Pfadabhängigkeiten**

Bei nutzerbezogenen Pfadabhängigkeiten liegt der Gedanke an das Auto als Statussymbol nahe. Aber diese Form der Integration des Autos im Allgemeinen und des Verbrennungsmotors im Besonderen in die Gesellschaft scheint sich zu wandeln. Auto Scout 24 hat die „Einschätzungen, Wünsche und Visionen“ untersucht, die sich mit dem Auto verbinden und stellt fest, dass 9,1% der Befragten überhaupt kein Auto mehr besitzen wollen und weitere 24,6% sind zu der Auffassung gelangt, dass das Privatauto kein Alleskönner sein muss. „Herstellern von Mittelklasse-Kombis und SUV, Inbegriff der bisher hochgeschätzten und bevorzugt gekauften Vielseitigkeit, sollte diese Neuausrichtung zu denken geben“ (Auto Scout 24 (Hrsg.), 2015, S. 10). Das Büro für Zukunftsfragen f/21 schwärmt gar in seiner Studie „Peak Auto“ (f/21 Büro für Zukunftsfragen, 2012, S. 13):

[22] Mit „Mobility House“ bietet bereits ein 2009 gegründetes Spezialunternehmen seine Leistungen an, wobei neben der Ladestation auch PV- und Speicheranlagen vertrieben und installiert werden, so dass zumindest für die Ladung daheim und im Sommer mit erneuerbarem Strom gefahren werden kann. Ein ähnliches Leistungsspektrum bietet Solar City an, welches mit gleichem Fokus vom Tesla Gründer Elon Musk gemeinsam mit zwei Partnern gegründet wurde und 2014 bereits 255 Millionen $ Umsatz erzielte. Hier stellt sich die Frage, ob die Handwerksunternehmen des Elektrohandwerks diesen neu entstehenden Markt recht-zeitig erkennen und die notwendigen Qualifikationen und ggf. Partnerschaften mit den Auto-häusern aufbauen. Vgl. http://mobilityhouse.com/de/ueber-uns/ vom 25.5.2016.

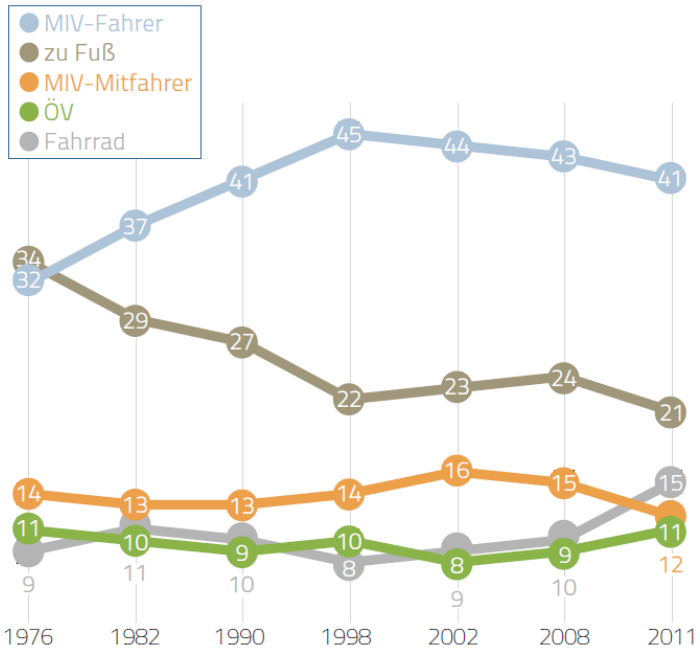
[23] Auch das Kraftfahrtbundesamt denkt offenbar in Verbrenner-Kategorien und muss sich an die Elektromobilität erst noch gewöhnen. Das mit zwei Motoroptionen angebotene Tesla Modell S (256 und 512 PS) wird in der Zulassungsstatistik 2015 bei 80 Exemplaren mit einer Leistung von bis zu 60 kW eingestuft, 999 mal mit bis zu 80 kW, 65 mal mit bis zu 100 kW und 438 mit einer Leistung darüber (Kraftfahrtbundesamt, 2016, S. 43). Aufgeschrieben haben die Statistiker dabei offenbar die Batteriekapazität, nicht die Motorleistung.

> Zwar wird das private Auto auch weiterhin eine bedeutende, aber gänzlich andere Stellung im Mobilitätsmix einnehmen. Das individualisierte private Auto von einst wird zum vernetzten Auto. Der Carsharing-Boom markiert den Startpunkt dieser Wende. Die vielen verschiedenen Ausprägungen des „geteilten Autos“ sind ein vielversprechendes Konzept und elementarer Baustein der Mobilität der Zukunft.

Selbst aus der Sicht des VDA wird festgestellt, dass der Motorisierungsgrad junger Leute gesunken ist (Schott, 2014, S. 2). Als eine Ursache wird der Trend zum Smartphone identifiziert. Wer permanent online sein will, sollte nicht selbst am Steuer sitzen und lieber mit den Öffentlichen fahren. Der VDA hofft dabei dann auf „Technologien wie die Spracherkennung zum Diktieren von E-Mails und für das Vorlesenlassen“ (Schott, 2014, S. 4) und letztlich auf das autonome Fahren, welches dann eine vom Verkehr unabhängige Beschäftigung zulässt, derweil aber weiter im eigenen Auto gefahren wird. „Eine Distanzierung vom Auto ist also auch auf lange Sicht nicht zu befürchten“ resümiert Schott (2014, S. 4).

Vermutlich hat der VDA gute Gründe, an eine allzu rasche Abkehr vom Auto nicht zu glauben. Die Daten, die zum Modalmix vorliegen (f/21 Büro für Zukunftsfragen, 2012, S. 5), zeigen immer noch eine deutliche Dominanz des Autos bei der Zurücklegung der täglichen Wege. 53% aller Wege werden immer noch als Fahrer oder Mitfahrer zurückgelegt, auch wenn dieser Wert seit der Jahrtausendwende um 6% gesunken ist.

Abbildung 11: Modal Split in Deutschland, 1976-2011



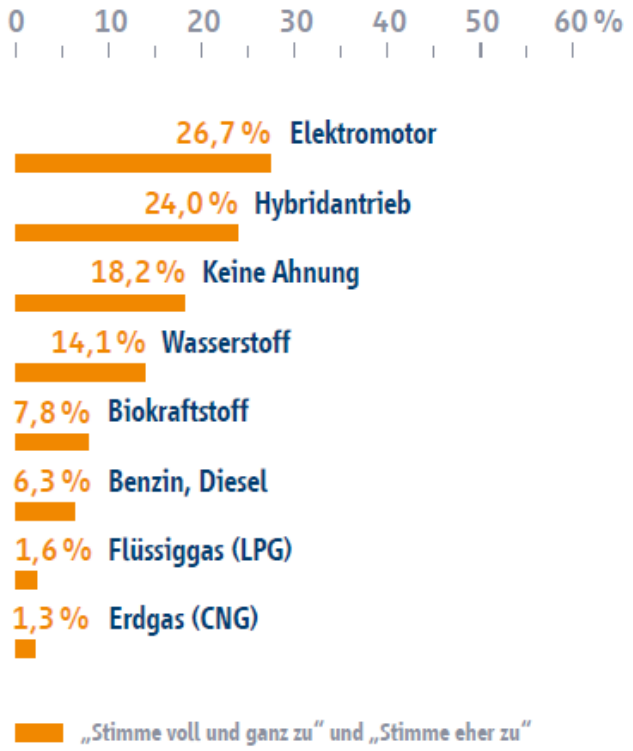
Quelle: f/21 Büro für Zukunftsfragen (2012, S. 5) nach Daten von infas

Die stabile Verankerung des Autos im Mobilitätsmix hat vielfältige Ursachen: Wohnen in der Peripherie der Städte und Arbeiten im Zentrum oder anderen Gemeinden, sinkende Zahl von Geschäften des Einzelhandels für den täglichen Bedarf mit immer längeren Wegen zum Supermarkt, Mobilität als Teil des Freizeitverhaltens und anderes mehr. Darüber hinaus bietet der PKW gerade mit Verbrennungsmotor die Möglichkeit, auch lange Urlaubsfahrten problemlos durchzuführen.

Dabei besteht die eigentliche Pfadabhängigkeit aber offensichtlich zum Auto als Fortbewegungsmittel, nicht zum Verbrennungsmotor. Von den durch Auto Scout 24 befragten 8.000

Europäern zwischen 18 und 65 Jahren sehen uns nur noch gute 6% auch 2040 noch Benziner oder Diesel fahren.

Abbildung 12: Vorstellungen von der Antriebstechnik in 25 Jahren



Quelle: Auto Scout 24 (2015, S. 18)

Nicht vergessen sollte man dabei aber, dass auch die seit Frühjahr 2016 ausgelobte Kaufprämie für Elektroautos den Absatz kaum zu steigern scheint. Als Gründe hierfür führt ein Interviewpartner die lückenhafte Ladeinfrastruktur sowie den immer noch, trotz Prämie, deutlichen Preisunterschied an. Auch die Unsicherheit bzw. Unzufriedenheit mit der Reichweite dürfte das Ihrige dazu tun. Bisher ist also der Wunsch nach einem Elektroantrieb noch eine Zukunftsvorstellung und spiegelt sich nicht in den aktuellen Nutzerwünschen und Verkaufszahlen von Verbrennungsmotoren.

3.3 Angriffspunkte und Schwächen des etablierten Pfades

Der zentrale Schwachpunkt des etablierten Pfades ist, dass der Antrieb mit Benzin- und Dieselmotoren in keiner Weise geeignet ist, den Weg zur Dekarbonisierung mitzugehen.

Ein zweiter Schwachpunkt liegt darin, dass zumindest der in Europa dominierende Dieselantrieb von einer Reihe großer Hersteller die gesetzlich festgelegten Emissionsgrenzwerte nicht einhält. Der Diesel-Abgasskandal mit seinem Fokus auf NO_x scheint sich zwar gegenwärtig noch nicht auf die aktuellen Diesel-Verkaufszahlen auszuwirken, aber die Gefahr eines Einknickens der Verkaufszahlen auf Grund des Skandals dürfte keinesfalls gebannt sein. Auch aus dem Problembereich Feinstaubemissionen sowie aus der Debatte um Umweltplakette und Umweltzonen können zusätzliche Probleme für den Diesel erwachsen. Im „Fahrwasser" des Abgasskandals kamen nochmals Informationen ins Bewusstsein der Öffentlichkeit, dass die auf Testständen ermittelten Angaben der Automobilhersteller zu den

Benzin- bzw. Dieselverbräuchen wenig mit den wirklichen Verbräuchen zu tun haben. Auch dies könnte sich auf das Image der Hersteller und ihrer Produkte auswirken.

Weiter ist die Tatsache, dass eine deutliche Mehrheit der Europäer den Benzin- und Dieselantrieb für nicht mehr zukunftsfähig hält (Abbildung 12) ebenfalls als Schwäche einzustufen. Selbst die Autojournalisten werden teilweise abtrünnig und Schreiben in einem Probefahrbericht des Tela X Sätze wie: „Und der Rest der Automobilindustrie muss sich fragen lassen, auf welchem Planeten sie mit irgendwelchen elektrischen Fingerübungen die Zeit verschlafen hat“ (Piper, 2016).

Demgegenüber steht eine Branche, die unerschütterlich selbstsicher ist und andererseits kaum über Patente, Sachwissen oder Produktionsmöglichkeiten für aus Sicht der Europäer zukunftsfähige Automobile verfügt.

4 Transformationsansätze

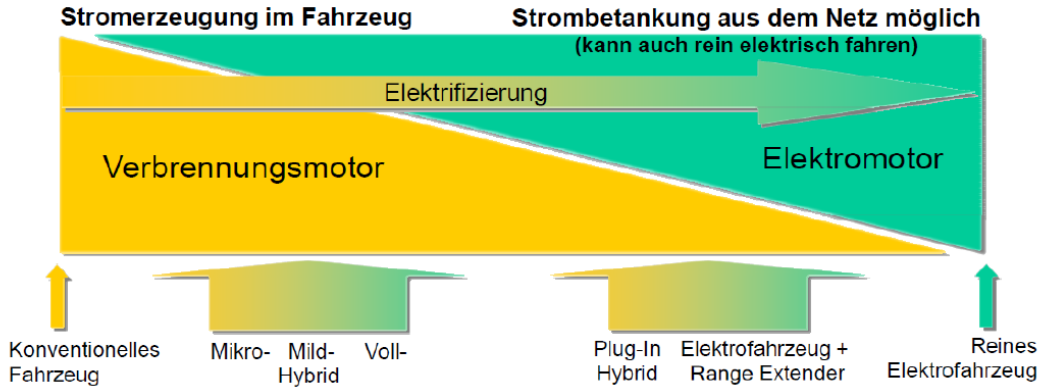
Das zentrale Ziel der Transformation der PKW-Antriebe besteht darin, drei wesentliche Umweltauswirkungen zu reduzieren:

- geringere CO_2-Emissionen durch höhere Effizienz sowie das Potenzial zur Nutzung regenerativer Energie,
- Schadstofffreiheit im Fahrzeugbetrieb sowie
- Reduktion der Lärmemission.[24]

Das Ziel der Klimaneutralität in 2050 ist aus Sicht der Umweltpolitik imperativ und aus heutiger Sicht ist es in absehbarer Zeit nur mit BEV erreichbar.

Wesentliche Bedeutung im Rahmen der Transformation haben die verschiedenen Varianten elektrischer Antriebe. Hier sieht das Umweltbundesamt (2015, S. 23) ein Kontinuum vom konventionellen Antrieb durch Verbrennungsmotor bis zum reinen Elektrofahrzeug.

Abbildung 13: Stufen der Elektrifizierung des Antriebsstranges



Quelle: IFEU (2011, S. 9)

Die radikalste Lösung ist dabei die Umstellung auf einen reinen Elektroantrieb, langfristig immer im Zusammenhang mit einer Versorgung mit 100% Regenerativstrom gedacht. Im auf die Einhaltung des 2°C-Ziels hin entwickelten „Szenario 450“ der internationalen Energieagentur errechnete die IEA schon 2009 die Notwendigkeit, in 2030 im globalen Mittel im Neuwagenmarkt einen Anteil von 7% BEV, 21% PEV und 29% HEV abzusetzen. Nur noch 43% des globalen Marktes in diesem Szenario verbleiben schon 2030 bei Benzin- und Dieselfahrzeugen.

Valentin-Urbschat (2014, S. 145) leiten aus den Zahlen zur Reduktion des Energieeinsatzes für die Mobilität im Szenario 450 die plausible Notwendigkeit ab, bis 2030 einen Anteil von ca. 25% BEV im Fahrzeug**bestand** der OECD-Länder zu etablieren. Das deutsche Ziel lautet seit 2011, in 2020 eine Million Elektrofahrzeuge auf die Straße zu bringen[25]. Das Szenario 450 würde es erforderlich machen, dass es schon 2030 ungefähr 10 Millionen Elektro-

[24] Hier sind aber auch von Elektroautos keine Wunder zu erwarten (K. Dudenhöffer, 2013, S. 40).

[25] Vgl. http://www.bmvi.de//Anlage/original_1091814/Nationaler-Entwicklungsplan-Elektromobilitaet.pdf vom 25.5.2016.

fahrzeuge sind. Vielfältige Maßnahmen wurden hierzu mit Blick auf BEV und PEV eingeleitet (Die Bundesregierung, 2011).

Auch die zivilgesellschaftlichen Kräfte in der Klima Allianz Deutschland (Klima Allianz Deutschland, 2016, S. 20) fordern den Markthochlauf alternativer Antriebe:

> Im Kern einer erfolgreichen Klimaschutzstrategie für den Verkehrssektor steht die maximale Reduktion des Endenergiebedarfs. Neben verkehrsvermeidenden und –verlagernden Maßnahmen sind die vollständige Ausschöpfung der Effizienzsteigerungspotenziale der Antriebe aller motorisierten Verkehrsträger sowie der Markthochlauf alternativer (teil)elektrischer Antriebe zentral. Vor allem der Pkw-Verkehr lässt sich bis 2050 durch weitere Effizienzsteigerungen und den parallel anlaufenden sukzessiven Umstieg auf Elektromobilität fast vollständig dekarbonisieren.

Aus der Sicht der Umweltverbände verspricht die Elektromobilität als Element einer Transformation zur Nachhaltigkeit nur dann eine wirklich umweltentlastende Wirkung, wenn sie Teil einer Verkehrswende ist und die Energiewende parallel und erfolgreich fortgesetzt wird (Lottsiepen, 2014). Nur durch den Erfolg der Energiewende lässt sich eine erneuerbare Stromversorgung der Elektromobile sichern und nur durch eine erfolgreiche Verkehrswende lässt sich der Modalsplit soweit vom PKW weg verlagern, dass wir in der Lage sein könnten, die Materialkreisläufe rundum diese große Zahl schwerer Wagen zu bewältigen. Canzler und Knie (2014) gehen in ihrem Zukunftsbild sogar noch weiter und sehen sowohl Strom wie auch Wärme und Verkehr als Teile einer gesellschaftlichen Versorgungsstruktur, die zu einem synergetischen „Gesamtkunstwerk“ weiter entwickelt werden muss.

4.1 PKW mit reinem Elektroantrieb

Für den reinen Elektroantrieb eines PKW wird der Verbrennungsmotor mit seinen Komponenten fortgelassen (siehe auch Abschnitt 3.2.3) und stattdessen ein oder zwei Elektromotoren an den Achsen oder in den Radnaben sowie eine Leistungselektronik zur Motorsteuerung und eine Batterie eingebaut. Obwohl Leistungselektronik und Elektromotoren erheblich leichter sind als ein Verbrennungsmotor ergibt sich ein Gewichtsnachteil, da die Batterien sehr schwer sind. Im BMW i3 ist eine Batterie von 230 kg mit 18,8 kWh Kapazität verbaut, im Tesla S wiegt das 85 kWh Batteriepack 544 kg.

Elektrofahrzeuge stoßen keine Emissionen wie NO_x oder Feinstaub aus. Klimafreundlich sind sie dann, wenn sie mit erneuerbarem Strom betrieben werden (siehe Abbildung 16). Da die Geräuschentwicklung des Antriebs eines PKW neben den Windgeräuschen und den Reifen nur einer von drei wichtigen Ursachen ist, wirkt sich der leise Elektroantrieb auf die Lärmemissionen nur bei niedrigen Geschwindigkeiten aus. Marbjerg (2013) wertet 22 vergleichende Studien zu Lärmemissionen von Elektro- und Verbrennungsfahrzeugen aus und findet schon bei Geschwindigkeiten von 40 bis 50 km/h nur noch Unterschiede in der Größenordnung von unter 5 db/A. Grund hierfür ist die schon bei diesen Geschwindigkeiten klare Dominanz von Reifen- und Windgeräuschen über Motorgeräusche. Bei einer Simulation der Lärmbelastung im Zentrum von Utrecht im Fall einer vollelektrischen Fahrzeugflotte dokumentiert die Studie einen um 3 bis 4 db/A reduzierten Schallpegel (Marbjerg, 2013, S. 41). Auch Dudenhöffer (2013, S. 40) dokumentiert bei 30 km/h und 40 km/h nur Unterschiede in der Größenordnung von 3 bis 5 dB(A) zwischen Wagen mit Verbrennungsmotor und Elektrofahrzeugen. 3 bis 5 db/A in Innenstädten ist zwar nicht wenig, aber ein „stiller Verkehr“ wäre etwas anders.

Obwohl der Tesla S mit 2.100 kg schwerer ist als die Mercedes S-Klasse geraten Autojournalisten ins Schwärmen, wie z.B. Stefan Anker in „Die Welt“ (Anker, 2014):

> Zwar ist die Höchstgeschwindigkeit bei 210 km/h abgeregelt, um die Akkus nicht zu schnell leerlaufen zu lassen. Aber die Beschleunigung von 4,4 Sekunden auf Tempo 100 – da muss man bei konkurrierenden S-Klassen oder 7er-BMW lange suchen, um so viel Temperament zu finden. Ein S63 AMG schafft die Übung in glatten vier Sekunden, der Tesla spielt also definitiv in der Champions League.

Auch Dirk Gulde rezensiert den BMW i3 – hier in der Version mit Range Extender - in der Auto Motor Sport vergleichsweise euphorisch (Gulde, 2014):

> Benziner, Tank und Generator erhöhen zwar das Leergewicht um rund 120 Kilo, womit der Viersitzer in 8,3 Sekunden – statt 7,5 wie die reine E-Variante – auf Tempo 100 spurtet. Doch damit liegt er auf dem Niveau des 118i, der in konventioneller Stahlbauweise gut 62 Kilo mehr wiegt. Auch mit Range Extender begeistert der BMW i3 durch seine Raketenstarts, die eine Umstellung des Fahrstils erfordern: Wer bei Gelb Vollstrom gibt, hat die Kreuzung bereits überquert, bevor die Ampel auf Grün springt. Bis der Verbrenner im 118i so richtig verbrennt und sein Drehmomentwandler wandelt, surrt der ansatzlose BMW i3 schon auf Stadttempo.

Gute Elektroautos zu bauen ist dabei genauso anspruchsvoll wie solche mit Benzin- oder Dieselantrieb. Auch beim Tesla gab und gibt es Kinderkrankheiten.[26] Auto, Motor und Sport vergleicht Tesla Model S und Porsche Panamera und konstatiert Unruhe und schnellen Wechsel zwischen leichtem Heckkick und Untersteuern. Auch an der strafferen Luftfederung wird Kritik geäußert. Überraschen tut das Resümee:[27]

> Die Leistungen des Model S sind für eine Start-up-Firma eine Sensation. Die Schwächen sind überschaubar und die Antriebsstärke eine Wucht. Der US-Liner ist das mit Abstand beste Marketing fürs Elektroauto.

In Punkto Wirtschaftlichkeit sieht es um die vergleichsweise neuen Elektrofahrzeuge noch kritisch aus. Der ADAC rechnet etwas höhere Kilometerpreise aus als bei Benzinern und Dieseln[28]. Der Grund dafür sind die hohen Anschaffungskosten, denn der Verbrauch von 10 kWh bis 15 kWh auf 100 km macht gerade mal 3 € bis 4,50 € aus[29], auch die Wartungskosten werden niedrig sein (e-mobil bw (Hrsg.), 2014). Und die Anschaffungskosten sinken. Kostet der in Deutschland seit 2013 erhältliche Tesla S noch über 70.000 € und wurde im Luxussegment platziert, so soll das Modell 3 um die 30.000 € kosten. Der Nissan Leaf wird schon heute mit Mietbatterie für knapp 24.000 € angeboten.[30] Damit sinkt das Preisniveau in die Größenordnung des ohnehin durchschnittlich für Neuwagen ausgegebenen Betrags von etwas über 28.000 € in 2015.[31] Ein Kippen der Marktanteile vom Verbrenner zum Stromer, wie zwischen 2006 und 2009 vom Röhrenmonitor zum Flachbildschirm (Clausen, 2016, S.

[26] Vgl. http://www.autobild.de/artikel/tesla-model-s-unzufriedene-besitzer-7053625.html vom 10.6.2016.

[27] Vgl. http://www.auto-motor-und-sport.de/vergleichstest/tesla-model-s-und-porsche-panamera-s-e-hybrid-der-voll-und-der-halb-elektriker-7897433.html vom 10.6.2016.

[28] Vgl. https://adacemobility.wordpress.com/2014/12/19/was-elektroautos-den-verbraucher-kosten/ vom 26.5.2016.

[29] Zum Vergleich: Ein Liter Super entspricht ungefähr 9 kWh, ein Liter Diesel ca. 10 kWh. Bei einem Verbrauch von ca. 6 l auf 100 km Diesel oder 7 l auf 100 km Super sind das ca. 60 kWh, die ein Verbrenner auf 100 km benötig. Da der Wirkungsgrad von Verbrennern bestenfalls bei 30% bis 40$ liegt, werden davon nur ca. 20 kWh für den Antrieb wirksam. Bei einem Preis von ca. 1,4 € pro Liter Super und 1,2 € pro Liter Diesel liegen die Verbrauchskosten in der Größenordnung von 7 € pro 100 km für den Diesel und 10 € pro 100 km bei Benzinern.

[30] Vgl. https://www.nissan-cdn.net/content/dam/Nissan/de/brochures/pkw/nissan-leaf-broschuere-preisliste-de.pdf vom 26.5.2016.

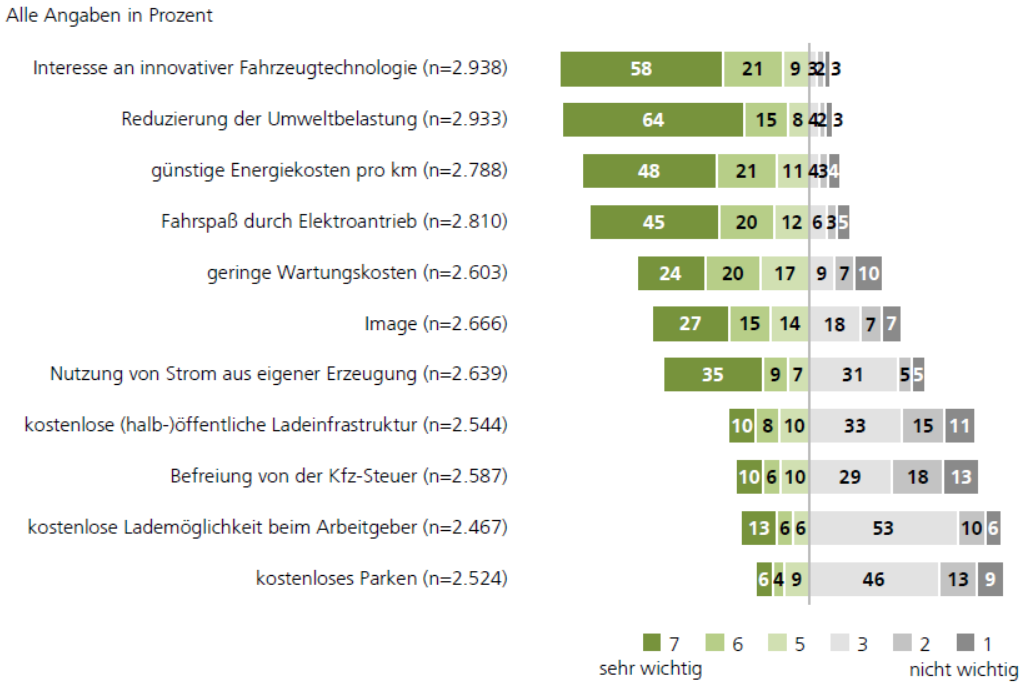
[31] Vgl. http://www.focus.de/auto/ratgeber/kosten/heute-28-153-euro-im-schnitt-preis-wahnsinn-so-explodierten-die-kosten-fuer-einen-neuwagen-seit-1980_id_4887167.html vom 26.5.2016.

21), könnte damit in der nahen Zukunft möglich werden – ein bedrohliches Szenario für die deutsche Automobilbranche. Schon dass die Post ihren elektrogetriebenen Zustellwagen selbst baut anstatt ihn bei einem Automobilhersteller zu kaufen ist aus Sicht eines Interviewpartners kein Ruhmesblatt für die Strategie der Autobauer.

Als Zielgruppen für Elektromobile scheinen zum einen Haushalte mit Zweitwagen geeignet. Unter den gegenwärtigen Elektroautokäufern verfügen 80% im Haushalt über weitere Fahrzeuge (Frenzel, Jarass, Trommer & Lenz, 2015, S. 27). Eine weitere Zielgruppe könnte mittelfristig in der Gruppe der Senioren liegen, denn auch diese fahren oft nicht mehr so weite Strecken wie junge und berufstätige Menschen.

Die Kaufmotive für Elektroautos wurden durch Frenzel at al. (2015, S. 33) untersucht. Zum Zeitpunkt der Untersuchung wurde die Käufergruppe (noch?) von technischen orientierten Innovatoren mit hohem Umweltbewusstsein dominiert. Die Käufer sind in 89% der Fälle Männer, viele davon mit deutlich überdurchschnittlichem Einkommen (Frenzel et al., 2015, S. 24).

Abbildung 14: Relevanz verschiedener Motive bei der Fahrzeuganschaffung



Quelle: Frenzel at al. (2015, S. 33) gewerbliche und private Befragte zusammengefasst, Mehrfachnennungen möglich

Der Besitz eines E-Mobils führt aber auch zu Einschränkungen. 56 % der befragten Besitzer eines E-Mobils gaben an, Urlaubsfahrten, Kurzurlaube, Wochenendausflüge oder auch Besuche bei Verwandten oder Bekannten nicht mit dem Elektrofahrzeug durchführen zu können (Frenzel et al., 2015, S. 43).

Als Hersteller spielen eine Reihe japanischer etablierter Hersteller eine dominierende Rolle. Hinzu kommt zumindest das kapitalstarke StartUp Tesla Motors. Aber auch BMW ist aktiv, Volkswagen arbeitet an einer Elektromobilitätsstrategie und Audi will ab 2020 mit dem A9 e-

tron den Tesla S ausstechen[32]. Der A9 soll eine Batterie mit 95kWh besitzen, 500 km Reichweite haben und auch teilautonom fahren.

Die bisherige Diffusion von Elektrofahrzeugen ist in Deutschland allerdings niedrig. Den Bestand an Elektro-Pkw gab das Kraftfahrtbundesamt zum Jahreswechsel 2015/2016 mit 25.502, den an Hybrid-Pkw mit 130.365 Einheiten an. Hergestellt werden diese Fahrzeuge gegenwärtig zum größten Anteil im Ausland. Die Zulassungsstatistik 2015 (Kraftfahrtbundesamt, 2016, S. 43) führen der Kia Soul (3.839), der Renault ZOE (1.787) und das Tesla Modell S (1.582) an. Von den deutschen Herstellern wurden der VW Golf (1.092), der BMW i3 (1.051), der Smart ForTwo (676), der VW Up (547) und die Mercedes B-Klasse (485) in der Zulassungsstatistik dokumentiert. Damit sind 31% des Marktes in der Hand heimischer Hersteller.

Ein Interviewpartner sieht die breite Diffusion der BEV erst dann, wenn noch leistungsfähigere Batterietechniken serienreif sind. 400 km reale Reichweite sieht er als Benchmark und weitere Grundlagenforschung an Batterietechnologien ist aus Sicht von zwei Interviewpartnern von besonderer Bedeutung.

Optimierungspotenzial bei Batterien scheint vorhanden zu sein. Ein zwei Jahre alter Test des österreichischen Automobilclubs zeigt, dass im Dauertest die Batteriekapazität des damaligen Mitshubishi i-MiEV nach nur 40.000 km Laufleistung um 17% nachließ.[33] Und viele Akteure versuchen sich an leistungsfähigeren und preiswerteren Zellen oder Batterien. Bosch ist dabei in den Batteriemarkt einzusteigen und strebt an, die Leistung der Batterien bis 2020 zu verdoppeln und den Preis zu halbieren (Bay, Hubik & Kölling, 2016). Auch Panasonic (Bay et al., 2016), die österreichischer Erfinder Gebrüder Kreisel[34] und andere Hersteller wollen die Preise drastisch senken sowie Leistung und Gewicht verbessern. Gleiches strebt auch Tesla in seiner am 1.8.2016 in Betrieb genommenen Gigafactory an.[35] Gegenwärtig bestimmt der Batteriepreis aber noch die Kostenstruktur von Elektrofahrzeugen.

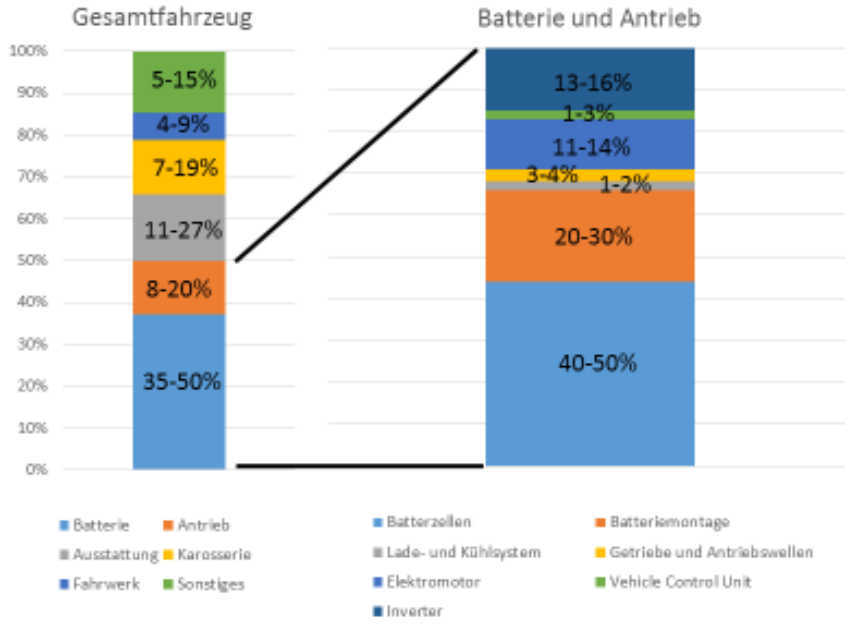
[32] Vgl. http://www.golem.de/news/elektroauto-audi-a9-e-tron-soll-2020-autonom-fahren-1608-122966.html vom 1.9.2016.

[33] Vgl. http://www.trend.at/leben/auto-motor/oeamtc-vernichtendes-urteil-elektroauto-langzeittest-5225079 vom 2.8.2016.

[34] Vgl. http://www.n-tv.de/auto/Neue-Akkus-lassen-Tesla-alt-aussehen-article18225661.html vom 1.9.2016.

[35] Vgl. http://www.auto-service.de/news/tesla/84202-tesla-gigafactory-batteriefabrik-produktion-nevada.html und https://www.tesla.com/de_DE/gigafactory vom 2.8.2016.

Abbildung 15: Kostenstruktur eines Elektrofahrzeugs



Quelle: aus Basis von Kampker et al. (2013, S. 47) unter Verwendung von Zahlen des Green Car Reports zur Aufteilung der Batteriekosten (2/3 Zellen, 1/3 Batterie-Pack)36

Der Anteil der mit dem Antrieb zusammenhängenden Kosten steigt also – zumindest in den nächsten Jahren - von 22 bis 24% beim Verbrenner auf 43 bis 70% bei Elektroauto. Für die deutsche Automobilbranche wird es also essentiell sein, möglichst große Teile der Wertschöpfungskette in eigener Regie abzuwickeln.

Elektromobile sind in letzter Konsequenz eine Konsistenzstrategie, zumindest, wenn man sie in ein Szenario mit grünem Strom einbettet (IFEU, 2011, S. 22) und die Recyclingproblematik löst.

4.2 Elektrofahrzeug mit Range Extender

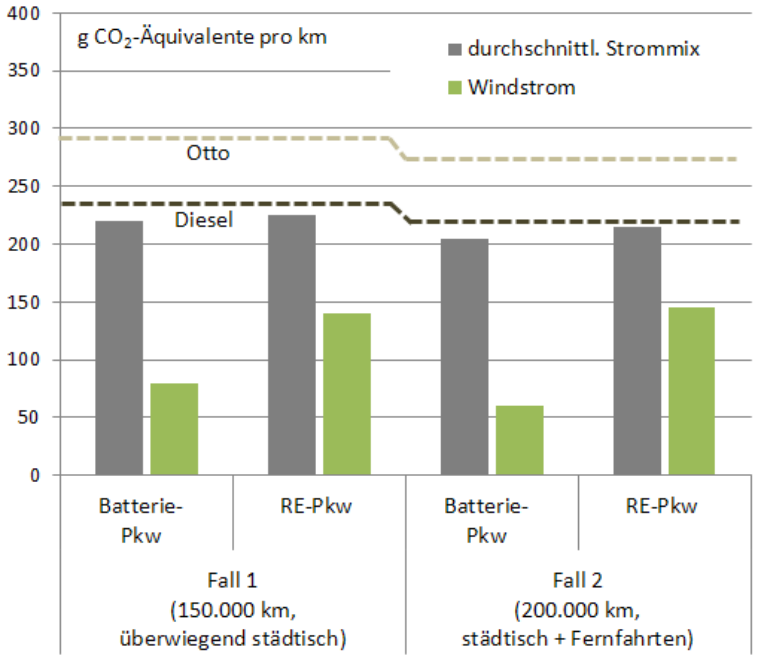
In den BMW i3 kann man sich einen 2-Zylinder Benzinmotor mit 34 PS und 647 cm³ Hubraum einbauen lassen. Er erhöht das Fahrzeuggewicht um ca. 120 kg und verdoppelt die Reichweite von ca. 150 km auf etwa 300 km. Der Tank ist nur 9 Liter groß. Nimmt man noch 2 oder 3 Fünfliter Kanister mit, kann man den Wagen so um die 500 km fahren, ohne eine Tankstelle oder Steckdose aufsuchen zu müssen. Der Range Extender verteuert den Wagen nochmals um ca. 5.000 € auf dann knapp 40.000 €.[37]

Ein Automobilkonstrukteur, der eher an 3-Liter Sechszylinder gewöhnt ist, wird einen solchen Minimotor sicherlich nicht besonders schätzen. Aber der Hauptkritikpunkt an Elektrofahrzeugen wird durch den Range Extender wirksam ausgeräumt: Die Reichweite wird größer und die unbedingte Abhängigkeit von der Steckdose hat sich erledigt.

[36] Vgl. http://www.greencarreports.com/news/1103667_electric-car-battery-costs-tesla-190-per-kwh-for-pack-gm-145-for-cells vom 1.9.2016.

[37] Vgl. http://www.auto-motor-und-sport.de/einzeltests/bmw-i3-range-extender-elektro-bmw-trifft-seine-kumpels-7974663.html vom 26.5.2016.

Abbildung 16: Klimabilanz für Elektro-PKW und PKW mit Range Extender



Quelle: IFEU (2011, S. 22), Darstellung unter http://www.emobil-umwelt.de/index.php/projektergebnisse/gesamtbilanzen/elektro-pkw-mit-range-extender vom 26.5.2016.

In der ökologischen Bewertung und unter der Annahme von 70% elektrischer Fahrtstrecke bei überwiegend städtischem Betrieb und 54% elektrischer Fahrtstrecke, wenn auch Fernfahrten erfolgen, wirkt sich der Range Extender zwar deutlich dämpfend auf die Klimaverträglichkeit aus, aber im Windstromszenario bleibt dennoch ein erheblicher Vorteil gegenüber einem Diesel- oder Benzinmotor.

Der Range Extender stellt einen zusätzlichen Materialaufwand dar und senkt den möglichen Effizienzgewinn des Elektroautos, er könnte aber als Brückentechnologie Bedeutung erlangen in der Zeit, in der die Reichweite mit Batterie noch nicht ausreicht und die Dichte an Ladestationen zu klein ist.

Eine völlig andere, fast suffiziente Idee eines Range Extenders entwickelt gegenwärtig das Unternehmen ONYX composites GmbH in Osnabrück mit einem Antrieb-Mix aus Elektromotor und Pedalkraft. Mit einer Reichweite von 25-50 Kilometern, einem Maximaltempo von 45 Stundenkilometern und einem Gewicht unter 100 Kilogramm (ohne Akku) soll der Zweisitzer dort zum Einsatz kommen, wo das Fahrrad an seine Reichweiten- und Komfortgrenzen stößt.“ [38]

[38] Vgl. http://www.onyx-composites.de/forschung-und-entwicklung/e-mobil/ vom 17.6.2016.

Abbildung 17: Entwurf eines Liegerades mit Karosserie von ONYX composites GmbH

Quelle: http://www.onyx-composites.de/forschung-und-entwicklung/e-mobil/ vom 17.6.2016.

Auch mit einem muskelgetriebenen Range Extender entfällt die Gefahr des Liegenbleibens, weil die Batterie leer ist. Sicher fokussiert das ONYX-Konzept nur auf die Kurzstrecken von Zweitwagen, aber es ist dennoch ein interessanter Hybrid zwischen dem erfolgreichen Pedelec und einem Kleinwagen.

Auch Elektromobile mit Range Extender sind eine Konsistenzstrategie, zumindest, wenn man sie in ein Szenario mit grünem Strom einbettet (IFEU, 2011, S. 22) und die Recyclingproblematik löst.

4.3 Brennstoffzellenantrieb

In einer Brennstoffzelle treffen Wasserstoff und Sauerstoff an einer Elektrolytmembran aufeinander und werden chemisch zu Wasser umgewandelt. Bei dieser Reaktion wird Strom frei, der entweder in Batterien gespeichert werden oder direkt dem Antrieb eines Elektromotors dienen kann.

An der Brennstoffzelle arbeiten seit 25 Jahren viele der großen Automobilhersteller weltweit (Greene & Duleep, 2013, S. 3). Die Leistung der Brennstoffzellenpakete wird dabei kontinuierlich größer und die Pakete werden kleiner (Greene & Duleep, 2013, S. 5). Lagen die Kosten für eine 85 kW Brennstoffzelle 2010 noch bei ca. 100.000 $, so sollen diese auf 25.000 $ in 2015 und unter 10.000 § in 2020 sinken (Greene & Duleep, 2013, S. 14) .

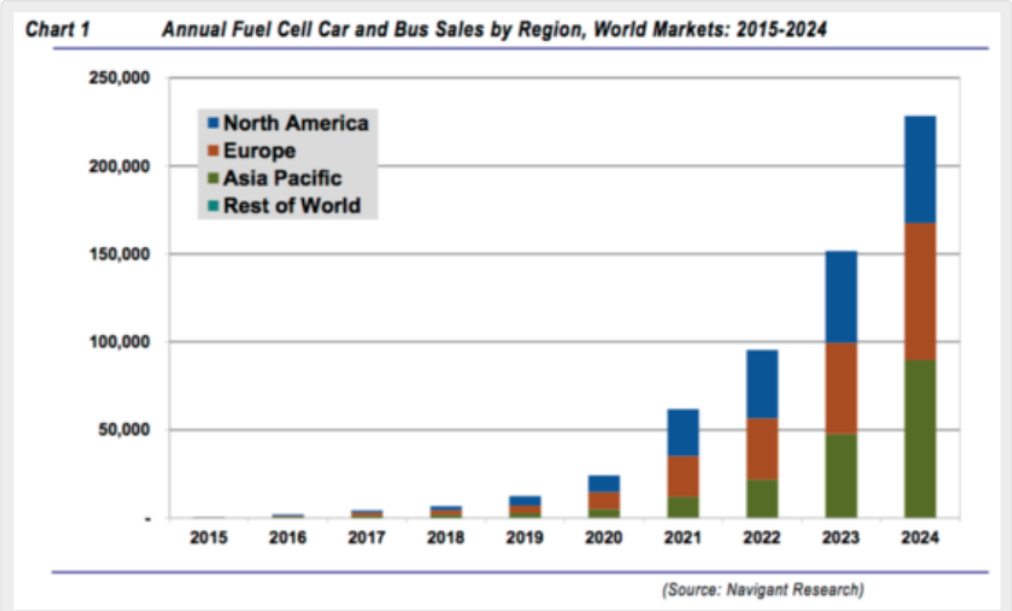
Aber die Brennstoffzelle ist noch weit von einem Durchbruch am Markt entfernt. Die gegenwärtig angebotenen Wagen sind teuer. 78.950 € will Toyota für den futuristisch anmutenden Mirai haben[39], der Honda Clarity soll etwas unter 50.000 € kosten.[40]

[39] Vgl. http://www.auto-motor-und-sport.de/news/toyota-fcv-brennstoffzellenauto-serienversion-mirai-startet-2015-8428208.html vom 26.5.2016.

[40] Vgl. http://www.autozeitung.de/auto-neuheiten/honda-clarity-fcv-2016-technische-daten-preise vom 26.5.2016.

Die Produktionszahlen sind noch minimal. Navigant Research schätzt den Bestand auf ca. 1.000 Brennstoffzellenfahrzeuge weltweit Ende 2015.

Abbildung 18: Jährliche Verkäufe von Brennstoffzellen PKW und Bussen



Quelle: Kane (2015)

Mit gerade einmal 240.000 abgesetzten Fahrzeugen Mitte der 2020er Jahre ist zu erwarten, dass die Brennstoffzelle noch für lange Zeit ein eher unbedeutender Antrieb bleibt.

Um die Ladeinfrastruktur ist es noch deutlich schlechter bestellt als für Stromer. Benzin und Dieselkraftstoff gibt es in Deutschland in über 14.000 Tankstellen, Wasserstoff führen dagegen bislang nur rund 20 öffentliche Stationen.[41] Und eine heimische Steckdose wie bei den Elektrofahrzeugen hilft auch nicht.

Das dem Linde Konzern, einem Hersteller von technischen Gasen, gehörende Carsharingunternehmen Beezero bietet seit August 2016 50 Brennstoffzellen-SUVs von Hyundai an. Das Ziel ist, erste Pilotnutzer von der neuen Technologie zu begeistern (Losch, 2016).

Hersteller tun sich also bisher schwer, erschwingliche Autos mit Wasserstoffantrieb zu bauen und die Infrastruktur ist noch nicht einmal lückenhaft, sondern eigentlich nicht vorhanden.

Brennstoffzellenfahrzeuge sind eine Konsistenzstrategie, zumindest, wenn man sie in ein Szenario mit Wasserstofferzeugung aus grünem Strom einbettet (IFEU, 2011, S. 22) und die Recyclingproblematik löst.

[41] Vgl. http://www.welt.de/motor/article155622650/Der-Kraftstoff-aus-dem-die-unerfuellten-Traeume-sind.html vom 26.5.2016.

4.4 Hybrid-PKW und Plug-in-Hybrid

Unter einem Hybridantrieb versteht man eine Kombination von zwei Antriebsarten. Am weitesten verbreitet ist die Kombination eines Verbrennungsmotors mit einem Elektromotor und einer etwas leistungsfähigeren Batterie als in einem Auto mit Verbrennungsmotor. Im Audi Q5 Hybrid hat sie eine Kapazität von 1,3 kWh[42], in einem Plug-in Hybrid benötigt sie zur Erzielung von 40 bis 50 km elektrischer Reichweite ca. 5 kWh Kapazität.

Der verbrauchssenkende Effekt eines normalen (nicht plug-in) Hybrid-PKW wird dadurch erreicht, dass diese Wagen die Bremsenergie vermittels Rekuperation wiedergewinnen und in die Batterie einspeisen können. Die Bremsenergie steht dann zum erneuten Beschleunigen wieder zur Verfügung. Insbesondere bei permanentem Stadtverkehr, z.B. im Falle von Taxis, ist dies die Erklärung für niedrige Verbräuche, z.B. des häufig als Taxi betriebenen Toyota Prius. Der Plug-in Hybrid hat darüber hinaus die Fähigkeit, die (kleine) Batterie an der heimischen Steckdose zu laden und dann die ersten 30 bis 50 km vollelektrisch zu fahren.

Hybridautos werden von allen hier dargestellten Antriebskonzepten in der größten Stuckzahl verkauft. In Deutschland wurden 2015 bereits 33.630 Hybridwagen zugelassen, davon ca. 1/3 Plug-Ins (Kraftfahrtbundesamt, 2016, S. 44), davon etwa die Hälfte (15.751) in der niedrigsten Leistungsklasse bis 80 kW und davon wiederum 14.466 von den japanischen Herstellern Toyota, Honda und Lexus. Die französischen Hersteller Citroen und Peugeot sind stark vertreten in der Leistungsklasse von 81 bis 120 kW mit 4.453 von 12.641 hergestellten Fahrzeugen. Hinzu kommen 2.137 Mitsubishi und 3.117 Volkswagen, größtenteils Golf und Passat. Hybridwagen über 121 kW finden sich im Angebot von Audi, BMW, Mercedes und Porsche. Hier waren aber 2015 die abgesetzten Zahlen noch klein: 189 Audi Q7, 393 BMW i8, 371 Wagen der Mercedes S-Klasse sowie 356 Porsche Cayenne. Die deutschen Oberklassemarken bieten so also Hybridautos an, verkaufen diese aber nur in extrem kleinen Stückzahlen. Erfahrungswissen rund um Elektromobile wird auch so nur wenig aufgebaut.

Wie weit aber auch die kleinen Hybridwagen zur Entlastung des Klimas beitragen harrt noch der Untersuchung. Green Car Reports[43] vermutet, dass früher oder später eventuelle Vorteile für Hybridfahrzeuge sich an der wirklich gefahrenen elektrischen Strecke werden bemessen lassen müssen:

> More than 50,000 Toyota Prius Plug-In Hybrids were sold from 2012 through last year, putting it among the five best-selling plug-in models. But its 11-mile electric range on the U.S. EPA test cycle was provided by a powertrain so minimalist that the engine often switched on if the owner breathed too hard. Toyota refused to release data on charging behavior, but it's widely assumed that many plug-in Priuses were sold in California only to get carpool-lane access--and never plugged in.

Das Hybridfahrzeug, zumindest in den Varianten der deutschen Hersteller, ist eigentlich kein Beitrag zur echten Transformation der PKW-Antriebe. Der Audi Q7 Hybrid hat z.B. zusätzlich zum Elektroantrieb noch einen 272 PS Diesel an Bord. Im normalen Fahrbetrieb verbraucht der Wagen laut Autobild um die 8 Liter Diesel auf 100 km.[44] Audi gibt den kombinierten

[42] Vgl. http://www.hybrid-autos.info/Hybrid-Fahrzeuge/Audi/audi-q5-hybrid-quattro-2010.html vom 26.5.2016.

[43] Vgl. http://www.greencarreports.com/news/1102160_top-six-trends-in-plug-in-electric-cars-through-2020/page-2 vom 27.5.2016.

[44] Vgl. http://www.autobild.de/artikel/audi-q7-e-tron-2015-fahrbericht-7105865.html vom 26.5.2016.

Kraftstoffverbrauch dagegen – auf dem Teststand nach „neuem europäischen Fahrzyklus“ gemessen - mit 1,8 bis 1,9 l pro 100 km an.[45]

Hybridfahrzeuge sind eine Effizienzstrategie und können wie auch andere technische Hybride (Kemp, 1994, S. 1037) als typische Übergangstechnologie gesehen werden.

4.5 Beurteilung der Transformationsansätze.

Die großen deutschen Hybrid-PKW stellen keinen eigentlichen Beitrag zu umweltfreundlicheren PKW-Antrieben dar. Die Gruppe der Plug-In Hybrids ist dagegen schon eher geeignet, die Durchschnittsverbräuche leicht zu reduzieren.

Brennstoffzellenfahrzeuge kann man zwar schon zu hohen Preisen kaufen, ihre Produktion in großen, den Markt verändernden Stückzahlen scheint jedoch vor der Mitte der 2020er Jahre eher unwahrscheinlich.

Die Transformation der PKW-Antriebe hin zu verbrauchseffizienten und schadstoffarmen Antrieben dürfte im Wesentlichen in den nächsten 10 Jahren durch batterieelektrische Fahrzeuge, einige davon mit Range Extender, vorangetrieben werden. Ein Interviewpartner hofft sogar auf völlig neue Batterietechniken mit höherer Leistung. Dieser Interviewpartner sieht allerdings auch noch Chancen, dass über neue Rohstoffquellen wie z.B. Algen genug Bioenergie zur Verfügung stehen könnte, um auch in Zukunft Benzin- oder Gasmotoren zu nutzen.

Aus Sicht der Nachhaltigkeit ist allerdings anzumerken, dass die Beurteilung der Elektrofahrzeuge hinsichtlich ökologischer Aspekte von der Art der Stromversorgung abhängig ist. Eine nachhaltige Mobilitätsstrategie kann so konsistent werden, muss dazu aber auch die Versorgung von Elektromobilen aus regenerativem Strom sicherstellen. Und sie muss mögliche Rohstoff- und Recyclingproblematiken (Lithium, Kupfer, Technologiemetalle) identifizieren und z.B. durch eine funktionierende Kreislaufwirtschaft lösen.

Im Feld der PKW-Antriebe geht es bei der Transformation zur Green Economy nicht nur um den aus klimapolitischer Sicht notwendigen Wandel zu einer energieeffizienten Mobilität sondern auch in besonderem Maße um die wirtschaftliche Position Deutschlands. Während Deutschland im Feld der regenerativen Energie als Technologieführer auftrat und hohe Stückzahlen z.B. von Windkraftwerken exportiert, hat die deutsche Automobilbranche den notwendigen Wandel lange Zeit ignoriert. Heute ist sie in einer Situation, in der sie einen gefährlich großen technologischen Rückstand aufholen und sich bemühen muss, nicht auf der Verliererseite zu verbleiben.

Die Stärken der Transformationsansätze liegen darin, dass sowohl erste Elektrofahrzeuge auf den Märkten vorhanden sind als auch darin, dass die Zukunftsvorstellung vieler Europäer ist, ein Elektrofahrzeug zu fahren (Abbildung 12). Weitere Stärken sind:

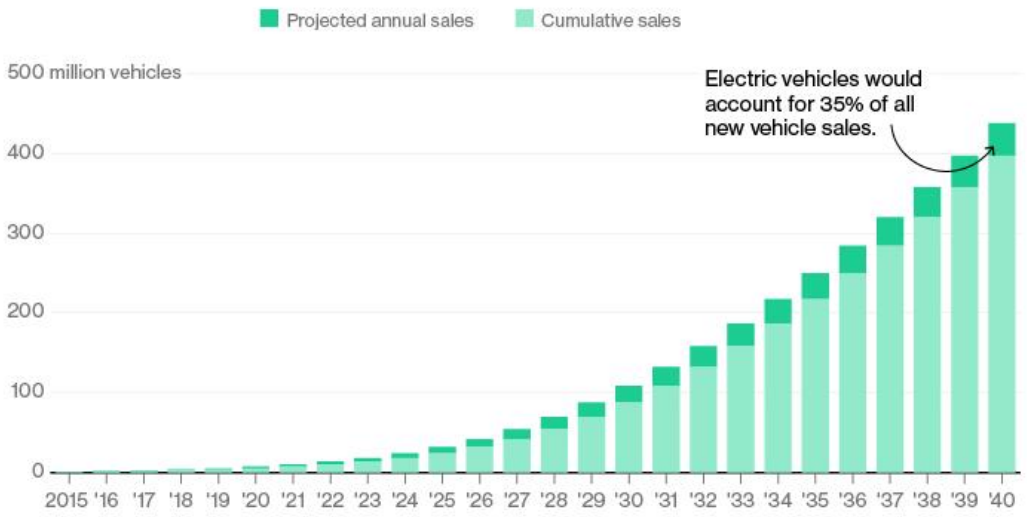
- die Aussicht auf exzellente Fahrdynamik,
- zumindest im Szenario wieder steigender Ölpreise sehr günstige Verbrauchskosten,
- die Aussicht – nach den Kinderkrankheiten der Technologie - auf eine noch höhere Zuverlässigkeit und geringere Wartungsintensität.

Die Produktion von Elektrofahrzeugen steht in den nächsten Jahren vor der entscheidenen Stufe der Aufskalierung. Bloomberg sieht eine echte Kostenparität von Elektromobilen und

[45] Vgl. https://www.audi-mediacenter.com/de/audi-q7-e-tron-quattro-tdi-66 vom 26.5.2016.

Verbrennern in 2022, der Zeitpunkt, ab dem die Märkte sich aus Sicht von Bloomberg sprunghaft verschieben werden: [46]

Abbildung 19: Bestand an Elektromobilen bis 2040



Quelle: Bloomberg (Randall, 2016)

Auch die IEA und die OECD sahen schon 2013 einen sich zwischen 2015 und 2020 von 2 auf 20 Millionen verzehnfachenden Bestand an Elektrofahrzeugen (OECD / IEA, 2013, S. 10).[47]

Der Pfad zur Transformation der PKW-Antriebe durch einen höheren Anteil von Elektroantrieben kann also von der Politik beschritten werden.

4.6 Das Akteurssystem der Transformation

Als Akteure der Transformation sind folgende Gruppen in Bezug auf einen möglichen Pfadwechsel von Belang:

- Die Bundesregierung, die mit dem Regierungsprogramm Elektromobilität (Die Bundesregierung, 2011) das Ziel verfolgt, in 2020 eine Million Elektrofahrzeuge auf der Straße zu haben,
- die deutschen Automobilhersteller, die sehr stark mit dem Technologiepfad der Verbrennungskraftmaschine verbunden sind und erst in 2016 wahrnehmbare Aktivitäten im Feld der Elektromobilität entwickeln sowie ihr zentraler Verband, der VDA,
- die japanischen und koreanischen Automobilhersteller, die sowohl aufgrund ihrer sich in der Zahl der Patentanmeldungen zeigenden hohen F&E-Anstrengungen wie auf-

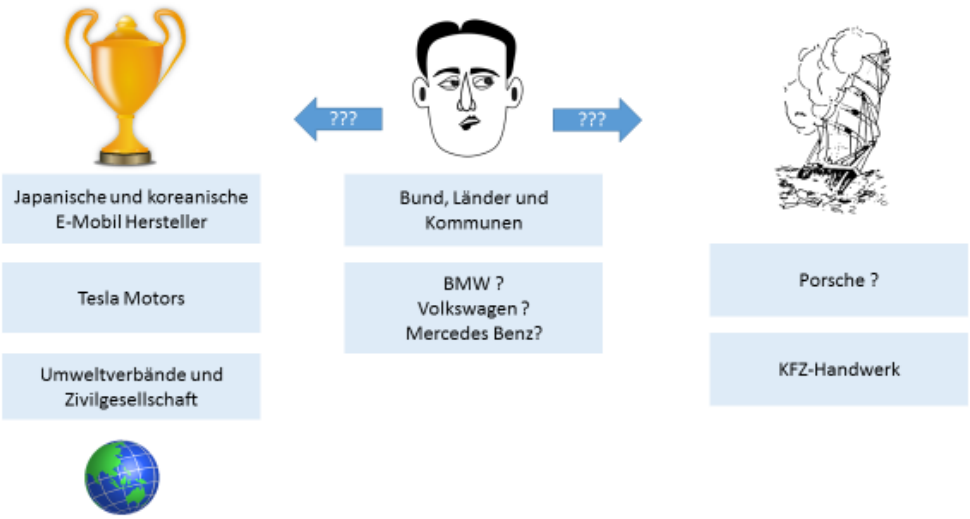
[46] Lottsiepen war da noch 2014 deutlich vorsichtiger und sah Elektroautos in absehbarer Zeit noch als deutlich teurer als Verbrenner (Lottsiepen, 2014).

[47] Volkswagen scheint mit einer nun geplanten Produktionszahl von 2 bis 3 Millionen Elektroautos in 2025 und mit einer eigenen Schätzung von 25% BEV am Autoabsatz in 2025 diese Zahlen als einer der ersten Autohersteller ernst zu nehmen (Volkswagen AG, 2016).

grund der produzierten Stückzahlen über die international beste Ausgangsposition in der Elektromobilität verfügen,

- das US-amerikanische StartUp Tesla Motors, welches sich mit dem für Ende 2017 angekündigten Modell 3 und der in Bau befindlichen Gigafactory bis zum Ende des Jahrzehnts zu einem ernst zu nehmenden Player im Automobilbau entwickeln könnte,
- das KFZ-Handwerk, welchem durch die Transformation zum Elektroauto erheblicher Umsatz wegbrechen wird sowie sein zentraler Verband der ZDK,
- die privaten und gewerblichen PKW-Käufer, zu zwei Dritteln Männer, von denen zur Zeit die erste Pionierkundengruppe Elektromobile und Plug-In Hybrids anschafft.
- Die zivilgesellschaftliche Kräfte haben sich in der Klima Allianz Deutschland (Klima Allianz Deutschland, 2016) zusammengeschlossen und fordern den Markthochlauf alternativer Antriebe.

Abbildung 20: Gewinner und Verlierer einer Verkehrswende durch alternative PKW-Antriebe



Quelle: Borderstep Institut

Exkurs: aktuelle Entwicklungen in der deutschen Automobilbranche

In den letzten Monaten gibt es eine Reihe von Hinweisen, dass die deutschen Automobilkonzerne doch langsam den Ernst der Lage realisieren. Volkswagen arbeitet an einer neuen Fahrzeugplattform für die Elektromobilität mit der es möglich werden, soll, „echte" Elektromobile zu bauen und keine umgerüsteten Benziner (Ruzic, 2016). In der am 16.6.2016 vorgestellten Strategie 2025 plant Volkswagen Investitionen in die Elektromobilität, Mobilitätsdienstleistungen und autonomes Fahren in zweistelliger Milliardenhöhe und eine Produktion von 2 bis 3 Millionen Elektroautos pro Jahr in 2025 (Volkswagen AG, 2016). Für die nötigen Batterien will VW neue Kernkompetenzen aufbauen und sie in einer eigenen Fabrik herstellen. Schon 2025 könnte VW einen Bedarf von 150 Gigawattstunden an Autobatterien haben. Daran hängen auch viele Jobs[48]. Ein möglicher Standort ist Salzgitter.[49] Motivatoren im Hintergrund könnten die Betriebsräte gewesen sein, denen die schon in absehbarer Zeit mögliche Gefährdung der Arbeitsplätze auf den Magen schlägt.

Die im Besitz von Daimler befindliche Deutsche Accumotive im sächsischen Kamenz montiert heute zugekaufte Zellen und wird von Daimler langsam ausgebaut.[50] Aus Sicht der Nationalen Plattform Elektromobilität (NPE) könnte die Zellproduktion in Deutschland mit der dritten Generation von Lithium-Ionen Zellen ab dem Jahr 2021 wirtschaftlich werden. Die NPE skizzierte eine Fabrik, die Zellen im Gegenwert von 13,9 Gigawattstunden (GWh) pro Jahr ausbringen könnte.[51]

[48] Tesla erwartet in seiner Gigafactory für „nur 35 GWh" 6.500 neue Arbeitsplätze.

[49] Vgl. http://www.spiegel.de/wirtschaft/unternehmen/vw-erwaegt-bau-gigantischer-batteriefabrik-fuer-elektroautos-a-1094407.html vom 27.5.2016.

[50] Vgl. http://www.wiwo.de/technologie/auto/elektroautos-wann-sich-eine-batteriefabrik-in-deutschland-lohnen-kann/13335606.html vom 13.6.2016.

[51] Vgl. http://www.wiwo.de/technologie/auto/elektroautos-wann-sich-eine-batteriefabrik-in-deutschland-lohnen-kann/13335606.html vom 13.6.2016.

5 Fazit und Möglichkeiten für Pfadwechsel

Der hier vorgelegte Bericht fokussiert auf die Transformation der Antriebstechnologie von Automobilen weg vom Verbrennungsmotor und hin zu Elektrofahrzeugen (incl. der Variante Elektrofahrzeuge mit Range Extender), Brennstoffzellenantrieben und Varianten der Hybridantriebe als Übergangstechnologie.

5.1 Pfadabhängigkeiten

Unruh (2000, S. 821) führt den letztlichen Durchbruch des Verbrennungsmotors im Wettbewerb mit Elektro- und Dampfantrieb am Anfang des 20. Jahrhunderts auf eher kleine, sich gegenseitig ergänzende Ereignisse zurück: den Abbau von Pferdetränken, aus denen auch Dampfautomobile Wasser entnommen haben und auch ein gewonnenes Rennen pferdeloser Wagen in den USA. Diese Ereignisse dürften zwar jedes für sich bewusst herbeigeführt worden sein, vermutlich aber nicht mit der Absicht, ein Lock-In zugunsten des Verbrennungsmotors herbeizuführen. Rückblickend können sie daher als kontingente Ereignisse eingestuft werden.

Durch die zunehmende Zahl von Automobilen in der Gesellschaft (Abbildung 3) verschob sich der Modal Split immer mehr zum motorisierten Individualverkehr (Abbildung 11). Parallel wuchs die Größe der Automobilhersteller und Zulieferer sowie die Zahl der Beschäftigten in Produktion und Werkstätten. Das Automobil – mit Verbrennungsmotor – entwickelte sich zum selbstverständlichen Element des Alltags und schrittweise wurden Infrastrukturen in bestimmter Richtung verändert: Wohnungen wurden fern von Arbeitsplätzen und Schulen gebaut oder gemietet, Geschäfte entstanden auf der grünen Wiese statt in den Innenstädten. Der Pfad des motorisierten Individualverkehrs stabilisierte sich seit den 1950er Jahren kontinuierlich stärker.

Dabei ist die (Pfad-)Abhängigkeit vom Automobil selbst größer als die vom „Bauteil“ Verbrennungsmotor. Als bedeutendste Pfadabhängigkeiten des Verbrennungsmotors als PKW-Antrieb sehen wir die folgenden:

- Niedrige Preise für Benzin und Diesel ermöglichen das Autofahren zu einem Preis, den die Autofahrer und Autofahrerinnen – mit Blick auf seinen Nutzen – offensichtlich zu zahlen bereit sind. Auch die Zahlungsbereitschaft für den Kauf des Automobils selbst ist im breiten Publikum vorhanden. Flossen 1970 noch 12,5% der Konsumausgaben privater Haushalte in den Verkehr, so waren es 1990 schon 20,3% und 2010 24,9% (vgl. Abschnitt 3.2.2).
- Bis in die 1990er Jahre hinein wurden ernsthafte Anstrengungen zur Entwicklung alternativer Antriebe nicht gemacht. Elektroantriebe wurden zwar für stationäre Anwendungen in der Industrie gebraucht und daher kontinuierlich verbessert, da sie aber nicht mobil eingesetzt wurden, verschwand die Batterietechnik langsam aus der deutschen universitären wie privaten Forschungslandschaft. Heute wird ein Großteil der Patente für dem elektrischen Antriebsstrang von Unternehmen in Ostasien gehalten. Auch das Startup Tesla in Kalifornien ist aktiv. Die deutsche Automobilbranche hat zwar ein wenig in Wasserstoffantriebe und Brennstoffzellen investiert, hat aber auch hier im Gegensatz zu Toyota und Honda keine verkaufsfähigen Produkte. Auch bei Elektroantrieben liegt sie im Rückstand (vgl. Abbildungen 9 und 10).
- Die Bindung der Hersteller wie auch der Zulieferer an den Verbrennungsmotor ist stark. Etwa ein Viertel der Arbeitsplätze in der Zulieferbranche sind konkret an den Antriebsstrang für Verbrennungsmaschinen gebunden. Mit den hochmotorisierten Premiummodellen verdienen Hersteller und Zulieferer viel Geld. Der große Hersteller

Volkswagen konnte noch vor wenigen Jahren nicht glauben, dass die Post wirklich ein elektrisch angetriebenes Lieferfahrzeug wollte, worauf die Post es dann eigenständig mit einem StartUp auf die Beine stellte.

- Wenig wirksame umweltrechtliche Vorschriften zur Reduktion des Ausstoßes von Treibhausgasen, Stickoxiden und Feinstaub machen es für die Hersteller attraktiv, kleinschrittige Verbesserungen durchzuführen anstatt auf grundsätzliche Änderungen des Antriebskonzeptes zu setzen.

Zwischen den Pfadabhängigkeiten bestehen insoweit Zusammenhänge, als sie nur zusammen die hohe Stabilität des technologischen Systems „Automobilität mit Verbrennungsmotor“ erklären können. Niedrige Treibstoffpreise zusammen mit der hohen Zahlungsbereitschaft der Kundschaft und angesichts eines komplett fehlenden bzw. wenig wirksamen umweltpolitischen Druckes zur Veränderung ließ Hersteller und Zulieferer immer mehr immer leistungsstärkere Fahrzeuge mit Verbrennungsmotor entwickeln und erfolgreich verkaufen.

5.2 Auswirkungen der Pfadabhängigkeiten auf die Transformationsansätze

Auf die in Kapitel 4 vorgestellten Transformationsansätze wirken sich die Pfadabhängigkeiten mit unterschiedlicher Intensität aus. Eine starke Pfadabhängigkeit stabilisiert dabei das System mit seinen Akteuren in besonders hohem Ausmaß. Sie stellt damit ein besonders starkes Hemmnis für einen Pfadwechsel dar.

Tabelle 1: Auswirkungen von Pfadabhängigkeiten auf Transformationsansätze

Transformationsansatz / Leitstrategie / Pfadabhängigkeit	Elektroantrieb Konsistenz	E-Antrieb Range Extender Kons./Effizienz	Brennstoffzellenantrieb Konsistenz	Hybrid-PKW Effizienz
Niedrige Brennstoffpreise	stark	mittel	stark	mittel
Technologischer Rückstand der deutschen Hersteller	stark	mittel	stark	mittel
Organisationale Bindung der Hersteller und Zulieferer an Verbrennungsmotoren	stark	mittel	stark	schwach
Wenig wirksame umweltrechtliche Vorschriften	stark	stark	stark	schwach

Wenig verwunderlich ist, dass die Hürden für eine Realisierung ökologisch konsistenter Lösungen höher sind als die für Effizienzlösungen. Konsistent sind dabei Elektroantriebe und Fahrzeuge mit Brennstoffzellen nur unter zwei Bedingungen: 100% regenerative Antriebsenergie und 100% Recyclingquote der jeweils eingesetzten (seltenen) Rohstoffe.

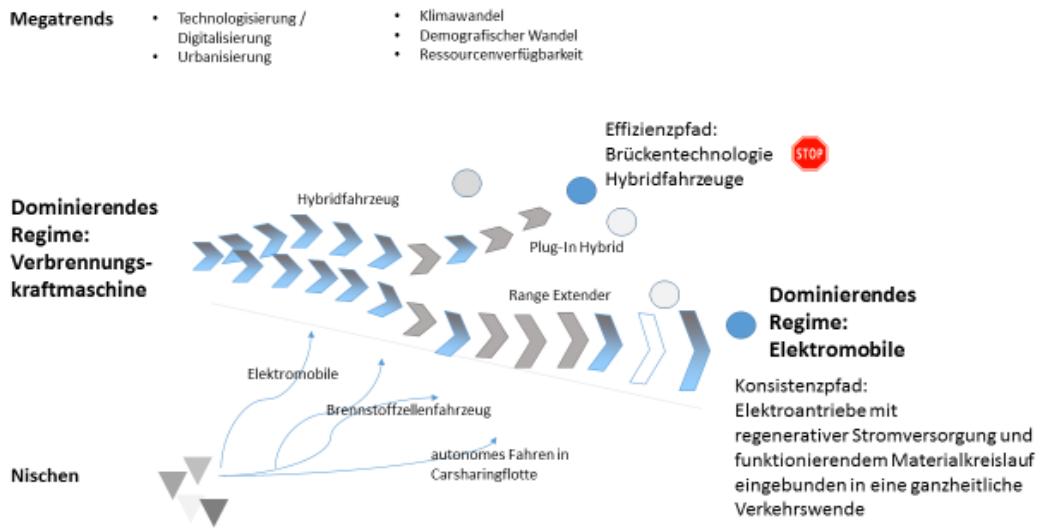
5.3 Erste Handlungsempfehlungen

Bei PKW-Antrieben ist ein grundsätzlicher Wechsel des vorherrschenden Pfades der Verbrennungskraftmaschine absehbar. Dieser Pfadwechsel bedingt:

- den Wechsel vom Verbrenner zu batterieelektrischen Fahrzeugen mit und ohne Range Extender, sämtliche Hybridvarianten dürften sich letztlich als Brückentechnologien erweisen,
- die Schließung von Lücken in Forschung und Produktentwicklung, da eine Reihe von wesentlichen Technologien (Batterien, Elektromotoren, Leistungselektronik und Ladetechnik) besonders in Deutschland nicht hinreichend weit entwickelt und aufeinander abgestimmt sind, wie dies denkbar und für den Pfadwechsel notwendig erscheint,
- die Anpassung des KFZ-Gewerbes an die Reparatur und Wartung von Elektrofahrzeugen.

Für diesen Pfadwechsel ist es erforderlich, dass eine Reihe von Nischentechnologien in das dominierende Regime vordringt.

Abbildung 21: Pfadwechsel PKW-Antriebe



Quelle: Borderstep

Sollen für diesen Pfadwechsel ökonomische Eigendynamiken freigesetzt werden, ist eine erhebliche Verschiebung der relativen Preise notwendig. Bis vor kurzem blockierten die niedrigen Preise für Benzin und Diesel in Deutschland nicht nur die Diffusion neuer Antriebskonzepte sondern sogar deren konsequente Entwicklung.

Für eine effektive Verkehrswende mit hohen Anteilen an “echten” Elektrofahrzeugen sind politische Maßnahmen erforderlich, die über das im Regierungsprogramm Elektromobilität enthaltene Spektrum deutlich hinausgehen. Schon Valentine-Urbaschat (2014, S. 583) gehen grundsätzlich davon aus, dass es für eine effektive Wende nicht nur eine Incentivierung von Elektrofahrzeugen sondern auch eine De-Incentivierung von Verbrennungsfahrzeugen erfordert. Eine solche “carrot and stick” Politik liegt auch dem Erfolg der Elektrofahrzeuge in Norwegen zu Grunde (Urban Foresight Limited, 2014, S. 19):

- Elektrofahrzeuge sind von der 25%igen Mehrwertsteuer befreit, die auf Verbrenner zu zahlen ist. Auch die Steuer für die Anmeldung des Autos (basierend auf Motorleistung, Stickoxidemissionen und CO2-Emissionen) wird EVs erlassen.[52]
- Es gibt die Erlaubnis zur Nutzung von Busspuren für Elektrofahrzeuge, die für Verbrenner gesperrt bleiben[53], mit dem Ergebnis, dass 64% der Elektrofahrzeugnutzer angeben, das Fahrzeug spare ihnen in erheblichem Umfang Zeit.
- Während in Norwegen die Strompreise für Privatkunden unterhalb des EU-Durchschnitts liegen[54], liegen die Benzin- und Dieselpreise an der europäischen Spitze.[55] 94% der Elektrofahrzeugnutzer geben daher auch an, dass das Fahrzeug preiswert zu nutzen wäre. Hierfür gibt es aber weitere Gründe. Hierzu gehören eine Befreiung von der Straßenmaut, die in Norwegen wichtigen Fähren können gratis genutzt werden, generell gilt für EVs freies Parken und an vielen öffentlichen Ladepunkten gibt es Gratis-Strom.

Nachdem bereits 2016 etwa 17% der Zulassungen auf BEV entfielen[56], baut Norwegen die Subventionen auf mittlere Sicht bis 2020 bereits wieder ab.[57] Ein Interviewpartner charakterisiert Norwegen wegen der reichlichen Verfügbarkeit von Wasserkraft als (energiepolitisches) Land der Glückseligen. Im Wasserkraftpotenzial läge auch einer der Gründe für die Aktivität Norwegens zur Elektromobilität. Die nationale Politik, bevorzugt die Wasserkraft als Input für das Energie- und Verkehrssystem zu nutzen und das Öl teuer zu verkaufen. Weiter hat Norwegen keine Autoindustrie, muss also auf keine Hersteller von Autos mit Verbrennungsmotor und deren Arbeitnehmer Rücksicht nehmen.

Das norwegische Maßnahmenpaket dürfte im Kontext einer in den nächsten Jahrzehnten kontinuierlich zunehmenden Versorgung mit regenerativem Strom auch für Deutschland ein guter Anfang sein, reicht aber in Deutschland eher nicht aus. Zusätzlich erscheinen aber weitere Maßnahmen von Bedeutung:

- Eine erhebliche Ausweitung der F&E Anstrengungen sowohl mit wie auch ohne öffentliche Förderung,
- die Ankündigung der Möglichkeit, ab ca. 2025 oder 2030 die Umweltzonen nur noch für EVs zu öffnen,
- sowie wiederum nach norwegischem Vorbild ein klarer Termin, von dem ab der Verkauf von Benzin- und Dieselfahrzeugen in Deutschland nicht mehr gestattet ist (Regjeringen Norge, 2016, S. 33).[58]

[52] Näheres auch auf http://www.elbil.no/elbilfakta/elbilens-fordeler vom 13.6.2016. Die Steuer kann bei Wagen mit über 250 g/km CO2-Ausstoß auf Beträge über 20.000 € ansteigen. Vgl. www.duh.de/uploads/media/Graphik_Zulassung_hoch.pdf vom 13.6.2016.

[53] In Kalifornien gibt es eine ähnliche Lösung mit Spuren für „High Occupancy Vehicles“, die aber auch von Nullemissionsfahrzeugen genutzt werden dürfen.

[54] Vgl. http://www.kwh-preis.de/strompreis-dossier-teil-5-strompreise-im-europaeischen-vergleich vom 27.5.2016.

[55] Vgl. http://www.clever-tanken.de/statistik/europapreise vom 27.5.2016.

[56] Vgl. http://www.shz.de/deutschland-welt/wirtschaft/markt-fuer-elektroautos-das-tesla-wunder-im-schatten-chinas-id13162746.html vom 13.6.2016.l

[57] Vgl. http://www.focus.de/auto/elektroauto/steuervorteile-werden-abgeschafft-norwegen-baut-vorteile-fuer-elektroautos-langsam-ab_id_4668934.html vom 13.6.2016.

[58] Auch das österreichische Umweltbundesamt rechnet Szenarien die davon ausgehen, dass der Verkauf von konventionell betriebenen PKW in Zukunft stark eingeschränkt wird und letztlich gegen Null geht (Umweltbundesamt Österreich (Hrsg.), 2016, S. 20).

Auch ein generelles Tempolimit von 120 oder 130 km/h auf Autobahnen könnte helfen, die leistungsstarken Verbrenner zu entzaubern. Möglich wären auch die Flottenförderung von BEV z.B. im Bestand von Carsharingunternehmen sowie die Ausbildung von Handwerkern (Elektrohandwerk oder KFZ-Handwerk) zur Installation von Ladestationen im öffentlichen wie privaten Raum.

Experteninterviews

Semistrukturierte Interviews wurden geführt mit:

- Hubertus von Laer, Ingenieurbüro von Laer, Pfinztal (29.5.2016).
- Gerd Lottsiepen, Verkehrspolitischer Sprecher, Verkehrsclub Deutschland e.V. (VCD) (9.6.2016)
- Michael Niedermeier, Referent Verkehr und Umwelt, ADAC e.V. (1.8.2016)
- Martin Refle; Manfred Wulff, Christian Sprute, VW-Emden, Betriebsrat (8.8.2016)

Als Interviewleitfaden fanden folgende Fragen Verwendung:

1) Wie wichtig sind alternative Antriebskonzepte in PKWs zur wirksamen Reduktion der Treibhausgasemissionen des Verkehrs und welche Lösungen sind am aussichtsreichsten?

2) Welche Pfadabhängigkeiten prägen das vorherrschende System der Herstellung von Benzin- und Dieselfahrzeugen? Durch welche Wirkungsmechanismen hemmen sie jeweils die Veränderung?

3) Welches sind die wichtigsten Technologiekomponenten, auf denen alternative Antriebskonzepte aufbauen müssten und die noch nicht serienreif verfügbar sind?

4) Welche politischen Maßnahmen sind erforderlich, so dass die Märkte hin zu alternativen Antriebskonzepten bewegen können?

Literaturverzeichnis

Anker, S. (2014, November 4). Testserie Fahrtenbuch: Das winzig kleine Problem des Tesla Model S. Die Welt. Hamburg.

Auto Scout 24 (Hrsg.). (2015). Unser Auto von morgen 2015. Einschätzungen, Wünsche und Visionen. München. Zugriff am 25.5.2016. Verfügbar unter: http://about.autoscout24.com/de-de/au-press/2015_as24_studie_auto_v_morgen.pdf

Bay, L., Hubik, F. & Kölling, M. (2016, August 26). Die Jagd nach der Superbatterie. Handelsblatt. Hamburg.

Becker, S., Hawranek, D., Knaup, H. & Müller, A.-K. (2016, Mai 14). Schmutzige Geheimnisse. Der Spiegel. Hamburg.

Behrendt, S., Göll, E. & Korte, F. (2016). Effizienz, Konsistenz, Suffizienz. Strategieanalytische Betrachtung für eine Green Economy. Berlin. Zugriff am 19.10.2016. Verfügbar unter: https://evolution2green.de/sites/evolution2green.de/files/documents/evolution2green_inputpapier_effizient_konsisten_suffizienz.pdf

Bittmann, V. (2014). Verkäufer wissen zu wenig über Elektroautos. VertriebsManager.

Breitlinger, M. (2016, April 22). Abgasskandal: Fast alle deutschen Hersteller starten Rückruf. Zeit Online. Hamburg.

Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS). (2009). Nationales Verkehrslärmschutzpaket II „Lärm vermeiden – vor Lärm schützen“. Berlin. Zugriff am 23.5.2016. Verfügbar unter: http://www.bmvi.de//cae/servlet/contentblob/27798/publicationFile/58/nationales-verkehrslaerm-schutzpaket-ii.pdf

Bundesministerium für Wirtschaft und Energie. (2016, September 3). Verordnung über technische Mindestanforderungen an den sicheren und interoperablen Aufbau und Betrieb von öffentlich zugänglichen Ladepunkten für Elektromobile (Ladesäulenverordnung – LSV). Zugriff am 24.5.2016. Verfügbar unter: http://www.bgbl.de/xaver/bgbl/start.xav?startbk=Bundesanzeiger_BGBl&start=//*%255B@attr_id=%27bgbl116s0457.pdf%27%255D#__bgbl__%2F%2F*[%40attr_id%3D%27bgbl116s0457.pdf%27]__1464080937746

Bundesverband der Deutschen Industrie. (1978). Antworten auf eine Herausforderung. Köln.

Büro für Technikfolgenabschaetzung beim Deutschen Bundestag (Hrsg.). (2012). Zukunft der Automobilindustrie. Innovationsreport. Berlin. Zugriff am 24.5.2016. Verfügbar unter: http://www.ricoh.de/Images/2_Buero_f%C3%BCr_Technikfolgen_Abschaetzung_Arbeitsbericht152_t_68-67160.pdf

Busse, M. (1980). Die Auto-Dämmerung: Sachzwänge für e. neue Verkehrspolitik (Fischer-Taschenbücher) (Orig.-Ausg.). Frankfurt am Main: Fischer-Taschenbuch-Verlag.

Canzler, W. & Knie, A. (2014). Mobil mit selbst gemachtem Strom. Politische Ökologie, 32 (Juni), 46–52.

Clausen, J. (2016). Evolutorische Ökonomik – Pfadabhängigkeiten. Evolution2Green Teilbericht zu AP 1.2. Berlin. Zugriff am 3.5.2016. Verfügbar unter: https://evolution2green.de/sites/evolution2green.de/files/documents/evolution2green_inputpapier_pfadabhaengigkeiten.pdf

Clausen, J., Brokmann, F. & Schellenberger, O. (1995). Selbstverpflichtungsabkommen im Umweltschutz (IÖW-Diskussionspapier) (Band 36). Berlin: IÖW.

Clausen, J. & Gandenberger, C. (2016). Umweltinnovationen und ihre Diffusion als Treiber der Green Economy - Erster Teilbericht (im Erscheinen). Dessau-Roßlau.

Deutsche Bank Research. (2009). Automobilindustrie am Beginn einer Zeitwende. Frankfurt am Main. Zugriff am 10.6.2015. Verfügbar unter: https://www.dbresearch.de/PROD/DBR_INTERNET_DE-PROD/PROD0000000000237289/Automobilindustrie+am+Beginn+einer+Zeitenwende.pdf

Deutsche Umwelthilfe. (2013). Die Tricks der Autohersteller. Weshalb sich die Angaben der Hersteller zum Spritverbrauch immer stärker von den tatsächlichen Verbräuchen im realen Straßenverkehr unterscheiden. Berlin. Zugriff am 10.6.2015. Verfügbar unter: http://www.duh.de/uploads/tx_duhdownloads/Hintergrund_MehrverbrauchPKW.pdf

Die Bundesregierung. (2011). Regierungsprogramm Elektromobilität. Berlin. Zugriff am 25.5.2016. Verfügbar unter: https://www.bmbf.de/files/programm_elektromobilitaet.pdf

Dudenhöffer, F. (2012). Ungenutztes Potenzial - Frauen als Neuwagenkäufer. Marke, (1), 68–72.

Dudenhöffer, F. (2013). Trendwende: Diesel - Marktanteile gehen zurück - aber Deutschland immer noch Lichtjahre von alternativen Antrieben entfern. Duisburg, Essen. Zugriff am 23.5.2016. Verfügbar unter: http://www.hanser-automotive.de/uploads/media/Artikel-07-13-Diesel.pdf

Dudenhöffer, K. (2013). Lärmemissionen von Elektroautos. Experimente zur Geräuschwahrnehmung. H2, 1, 40–41.

e-mobil bw (Hrsg.). (2014). Entiwcklung der Beschäftigung im After-Sales. Effekte aus der Elektromobilität. Stuttgart. Verfügbar unter: http://www.e-mobilbw.de/de/service/publikationen.html

e-mobil bw (Hrsg.). (2015). Elektromobilität weltweit. Baden-Württemberg im internationalen Vergleich. Stuttgart. Zugriff am 24.5.2016. Verfügbar unter: http://www.e-mobilbw.de/files/e-mobil/content/DE/Service/Publikationen/e-papers/internationales_Benchmarking/

f/21 Büro für Zukunftsfragen. (2012). Peak Car Das Auto erfindet sich neu. Berlin. Zugriff am 22.3.2016. Verfügbar unter: http://www.f-21.de/downloads/f21_auftragsstudie_peakcar.pdf

Fichter, K. & Clausen, J. (2013). Erfolg und Scheitern „grüner“ Innovationen. Marburg: Metropolis.

Frenzel, I., Jarass, J., Trommer, S. & Lenz, B. (2015). Erstnutzer von Elektrofahrzeugen in Deutschland. Nutzerprofile, Anschaffung, Fahrzeugnutzung. Berlin. Zugriff am 26.5.2016. Verfügbar unter: http://www.dlr.de/vf/Portaldata/12/Resources/dokumente/projekte/pakt2/Ergebnisbericht_E-Nutzer_2015.pdf

Greene, D.L. & Duleep, G. (2013). Status and Prospects of the Global Automotive Fuel Cell Industry and Plans for Deployment of Fuel Cell Vehicles and Hydrogen Refueling Infrastructure. Oak Ridge. Zugriff am 26.5.2016. Verfügbar unter: https://www1.eere.energy.gov/hydrogenandfuelcells/pdfs/fcev_status_prospects_july2013.pdf

Gulde, D. (2014, April 2). BMW i3 Range Extender im Test: Elektro-BMW trifft seine Kumpels. Auto Motor Sport online.

ICCT, TNO, IFEU & Sidekick. (2013). From Laboratory to Road: A Comparison of official and real-world fuel consumption and CO2 values for cars in the EU and US. Washington D.C. Zugriff am 10.6.2015. Verfügbar unter: http://www.theicct.org/sites/default/files/publications/ICCT_LabToRoad_20130527.pdf

IFEU. (2011). UMBReLA Umweltbilanzen Elektromobilität Ergebnisbericht. Heidelberg. Zugriff am 26.5.2016. Verfügbar unter: http://www.emobil-umwelt.de/images/ergebnisbericht/ifeu_(2011)_-_UMBReLA_ergebnisbericht.pdf

Institut für Kraftfahrzeuge Strategie und Beratung RWTH Aachen. (2014). CO2-Emissionsreduktion bei Pkw und leichten Nutzfahrzeugen nach 2020. Aachen. Zugriff am

13.6.2016. Verfügbar unter: http://www.bmwi.de/BMWi/Redaktion/PDF/Publikationen/co2-emissionsreduktion-bei-pkw-und-leichten-nutzfahrzeugen-nach-2020-abschlussbericht,property=pdf,bereich=bmwi2012,sprache=de,rwb=true.pdf

Kampker, A., Vallée, D. & Schnettler, A. (Hrsg.). (2013). Elektromobilität: Grundlagen einer Zukunftstechnologie. Berlin Heidelberg: Springer Vieweg.

Kane, M. (2015, Dezember 17). Navigant: Fuel Cell Vehicle Sales To Exceed 228,000 Units By 2024. Inside EVs. Zugriff am 16.9.2016. Verfügbar unter: http://insideevs.com/navigant-fuel-cell-vehicle-sales-exceed-228000-units-2024/

Kemp, R. (1994). Technology and the transition to environmental sustainability. Futures, 26, 1023–1046.

Klima Allianz Deutschland. (2016). Klimaschutzplan 2050 der deutschen Zivilgesellschaft. Berlin. Zugriff am 28.4.2016. Verfügbar unter: https://www.wwf.de/fileadmin/fm-wwf/Publikationen-PDF/Klimaschutzplan2050_final.pdf

Klimaallianz Deutschland. (2012). Das Dienstwagenprivileg. Berlin. Zugriff am 15.9.2016. Verfügbar unter: https://www.bund.net/fileadmin/bundnet/pdfs/verkehr/autoverkehr/121015_bund_verkehr_dienstwagenprivileg_broschuere.pdf

Knoflacher, H. (2014). Das Auto im Kopf. Politische Ökologie, 32 (Juni), 25–31.

Kraftfahrtbundesamt. (2016). Fahrzeugzulassungen (FZ) Neuzulassungen von Kraftfahrzeugen nach Umwelt-Merkmalen Jahr 2015 FZ 14. Flensburg. Zugriff am 26.5.2016. Verfügbar unter: http://www.kba.de/SharedDocs/Publikationen/DE/Statistik/Fahrzeuge/FZ/2015/fz14_2015_pdf.pdf?__blob=publicationFile&v=3

Lobby Control. (2013). Lobbyreport 2013 Die Lobbyismus-Debatte 2009-2013: Eine Bilanz der schwarz-gelben Regierungszeit. Köln.

Losch, R. (2016, August 16). Mit der Breenstoffzelle zum Gardasee. Hannoversche Allgemeine Zeitung, 9. Hannover.

Lottsiepen, G. (2014). Raus auf die Straße. Chancen von E-Mobilität und Elektroautos. Politische Ökologie, 32 (Juni), 74–80.

OECD / IEA. (2013). EV OUTLOOK. Understanding the Electric Vehicle Landscape to 2020. Paris. Zugriff am 27.5.2016. Verfügbar unter: https://www.iea.org/publications/globalevoutlook_2013.pdf

Pfäfflin, H. (2015, November 11). Elektrifizierung nach Maß - Risikoanalyse für BR. Gehalten auf der BR-Workshop des IG Metall Bezirks Baden-Württemberg ,Elektromobilität und Auswirkungen auf die Kfz-Zulieferer, Leutenbach.

Piper, G. (2016, März 9). Wie von einem anderen Stern: das Model X von Tesla. Hannoversche Allgemeine Zeitung.

Pricewaterhouse Coopers. (2014). Top 100 companies Europe and Germany. Frankfurt am Main. Verfügbar unter: http://www.pwc.de/de/kapitalmarktorientierte-unternehmen/assets/healthcare-und-pharma-werte-sind-bei-anlegern-besonders-gefragt.pdf

Randall, T. (2016). Here's How Electric Cars Will Cause the Next Oil Crisis. A shift is under way that will lead to widespread adoption of EVs in the next decade. Zugriff am 20.6.2016. Verfügbar unter: http://www.bloomberg.com/features/2016-ev-oil-crisis/

Regjeringen Norge. (2016). Grunnlagsdokument Nasjonal transportplan 2018-2029. Oslo. Zugriff am 27.5.2016. Verfügbar unter: https://www.regjeringen.no/contentassets/b7cd552f97da4c79880ea344fd831609/ntp_grunnlag_290216_web.pdf

Ruzic, L. (2016, Mai 23). Apple als Vorbild. Hannoversche Allgemeine Zeitung.

Schott, V. (2014). Junge Leute – Abwendung vom Auto? Internationales Verkehrswesen, 66 (3), 2–4.

Statistisches Bundesamt (Hrsg.). (2011). Preise auf einen Blick. Wiesbaden. Zugriff am 26.5.2016. Verfügbar unter: https://www.destatis.de/DE/Publikationen/Thematisch/Preise/Verbraucherpreise/PreiseAufEinenBlick0170005107004.pdf?__blob=publicationFile

Transparency Interernational. (2014). Lobbying in Deutschland. Berlin. Verfügbar unter: https://www.lobbycontrol.de/wp-content/uploads/Lobbying_in_Deutschland_2014.pdf

Umweltbundesamt (Hrsg.). (2014). Umweltschädliche Subventionen in Deutschland. Aktualisierte Ausgabe 2014. Desass-Rosslau. Zugriff am 5.8.2016. Verfügbar unter: https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/378/publikationen/umweltschaedliche_subventionen_2014_0.pdf

Umweltbundesamt (Hrsg.). (2015). Postfossile Energieversorgungsoptionen für einen treibhausgasneutralen Verkehr im Jahr 2050 – eine verkehrsträgerübergreifende Bewertung. Dessau-Roßlau. Zugriff am 23.5.2016. Verfügbar unter: https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/378/publikationen/texte_30_2015_postfossile_energieversorgungsoptionen.pdf

Umweltbundesamt Österreich (Hrsg.). (2016). Szenario erneuerbare Energie 2030 und 2050. Wien. Zugriff am 2.8.2016. Verfügbar unter: http://www.umweltbundesamt.at/fileadmin/site/publikationen/REP0576.pdf

Unruh, G.C. (2000). Understanding carbon lock-in. Energy Policy, 28, 817–830.

Urban Foresight Limited. (2014). EV City Casebook - 50 Big Ideas Shaping the Future of Electric Mobility. London. Zugriff am 27.5.2016. Verfügbar unter: http://www.cleanenergyministerial.org/Portals/2/pdfs/EVI_2014_EV-City-Casebook.pdf

Valentine-Urbschat, M. & Valentine-Urbschat, N. (2014). Elektrisiert. München.

Volkswagen AG. (2016). Neue Konzernstrategie beschlossen. Wolfsburg.

Wirtschaftsgesellschaft des Kraftfahrzeuggewerbes mbH. (2014). Das Kfz-Gewerbe: Gemeinsam stark. Bonn. Zugriff am 23.5.2016. Verfügbar unter: https://www.kfzgewerbe.de/wir-ueber-uns/imagebroschuere.html

Zanker, C. (2015, November 11). Elektromobilität weltweit und Effekte für Zulieferer. Gehalten auf der BR-Workshop des IG Metall Bezirks Baden-Württemberg ,Elektromobilität und Auswirkungen auf die Kfz-Zulieferer, Leutenbach. Zugriff am 24.5.2016. Verfügbar unter: www.bw.igm.de