

2 Untersuchungsrahmen und Fahrzeugtechnologien

Forschungsfragen

1. Welchen Einfluss hat der Pkw-Verkehr auf den Energieverbrauch und die CO₂-Emissionen?
2. Welche externen Einflussfaktoren wirken auf die Entwicklung und die Marktdurchdringung von alternativen und konventionellen Fahrzeugantrieben?
3. Wie ist der Entwicklungsstand von alternativen und konventionellen Fahrzeugantrieben und deren Schlüsseltechnologien?

2.1 Externe Einflussfaktoren auf alternative und konventionelle Antriebe

In Abbildung 3 sind die fünf großen externen Einflussfaktoren, die auf die alternativen und konventionellen Antriebe wirken dargestellt. Im Folgenden werden diese Einflussfaktoren ausführlich diskutiert und wichtige Parameter für die weiteren Untersuchungen identifiziert.



Abbildung 3: Externe Einflussfaktoren auf alternative und konventionelle Antriebe

2.1.1 Klimawandel und CO₂-Emissionen des Verkehrs

„Die Menschen führen momentan ein großangelegtes geophysikalisches Experiment aus, das so weder in der Vergangenheit hätte passieren können noch in der Zukunft wiederholt werden kann“, Roger Revelle (1957) New York Times

Nach dem zweiten Weltkrieg hatte Roger Revelle die Dimensionen des Klimawandels durch die weltwirtschaftliche Entwicklung und das von Menschen dadurch vermehrt ausgestoßene Kohlenstoffdioxid untersucht und mit diesem Satz in der New York Times bereits 1957 auf den Punkt gebracht. Der Mensch hat jedoch schon vor Jahrtausenden begonnen, Wälder zu roden und Sümpfe trockenulegen und damit weit vor der industriellen Revolution nachhaltig in das Klimasystem der Erde eingegriffen. Der Begriff Klima ist in seiner heutigen Verwendung ein mathematisches Konstrukt, was das über längere Zeiträume gemittelte Wetter an einem Ort bezeichnet. Die Ermittlung von Klimadaten erfolgt bestenfalls standardisiert nach den Vorgaben der World Meteorological Organization (WMO), wonach meteorologische Kenngrößen wie Luftdruck, Temperatur oder Niederschlag alle sechs Stunden an verschiedenen Orten der Erde erhoben und archiviert werden.¹⁴

Unter dem vom Menschen verursachten Klimawandel wird die globale Erwärmung infolge der in der Atmosphäre ansteigenden Konzentration von Treibhausgasen gesehen. Die wichtigsten Treibhausgase der Atmosphäre sind Wasserdampf, Kohlenstoffdioxid (CO₂), Methan (CH₄), Lachgas (N₂O) und halogenierte Kohlenwasserstoffe (HKW). Treibhausgase lassen die kurzweilige Sonnenstrahlung bis zur Erdoberfläche durch, absorbieren aber die langweilige zurückgestrahlte Wärmestrahlung, um sie später in alle Richtungen gleichmäßig wieder abstrahlen. Dadurch kommt ein Teil der Wärmestrahlung wieder zurück zur Erde und erwärmt dort die Oberfläche.¹⁵ Dieser Effekt wird als Treibhauseffekt bezeichnet. Ohne diesen natürlichen Treibhauseffekt würde die durchschnittliche Temperatur auf der Erdoberfläche bei -18 °C liegen, anstelle der 14 °C heute.¹⁶ Man geht davon aus, dass die CO₂-Konzentration in der Atmosphäre vor der Industrialisierung bei 280 ppm¹⁷ lag. Im Jahr 2010 lag sie schon bei ungefähr 390 ppm¹⁸, obwohl etwa die Hälfte des seit der Industrialisierung vom Menschen in die Atmosphäre entlassene CO₂ wieder durch Pflanzen und Meere aufgenommen und gebunden wurde. Die Entfernung des CO₂ aus der Atmosphäre erfolgt durch den sogenannten Kohlenstoffkreislauf, sowohl auf biologischen als auch auf chemischem Weg.¹⁹ Eine erhöhte CO₂-Konzentration in der Luft bedeutet für die Pflanzen tendenziell mehr Ausgangsmaterial für die Photosynthese, was wiederum das Pflanzenwachstum und die damit verbundene CO₂-Aufnahme beschleunigt. Dort wird der Kohlenstoff allerdings nach dem Absterben der Pflanze wieder freigesetzt oder langfristig in Böden oder Sedimenten eingelagert. Auf geologischem Wege wird bei der Gesteinsverwitterung CO₂ gebunden, was über die Flüsse langfristig in die Ozeane gelangt und dort in Kalkablagerungen wie Korallenriffen oder Sedimenten gebunden wird.²⁰ Bei Meerwasser ändert sich allerdings auch die Löslichkeit von Gasen bei der Erwärmung. Bei steigender Temperatur nimmt die Aufnahme-

¹⁴ Vgl. Latif (2012), S. 6ff.

¹⁵ Vgl. GeoForschungsZentrum (2012), S. 6.

¹⁶ Jones, New, et al. (1999), S. 173.

¹⁷ Englisch: parts per million, Deutsch: Teile pro einer Millionen.

¹⁸ Das entspricht einer Steigerung um 40 %.

¹⁹ Vgl. Latif (2012), S. 12f.

²⁰ GeoForschungsZentrum (2012), S. 5.

fähigkeit für Kohlenstoffdioxid ab. Weitere klimabeeinflussende Faktoren der globalen Erwärmung sind die veränderte Wolken- und Windbildung oder eine mögliche Destabilisierung gefrorener Kontinental-Methanvorkommen. Die Zerstörung der auch als UV-Filter wirkenden stratosphärischen Ozonschicht ist ebenso klimabeeinflussend wie die über längere Zeiträume veränderte Strahlungsintensität der Sonne. Weitere Faktoren, die das Klimasystem antreiben, sind die schwankenden orbitalen Bahnparameter der Erde und die Veränderung geologisch-tektonischer Prozesse, die das Verhältnis der Landmasse zum Wasser ändern oder einen erhöhten Vulkanismus bedingen.²¹ Im Vergleich zu physikalischen Vorgängen existieren für diese Phänomene aber keine allgemeingültigen Gesetze, welche in Form von mathematischen Gleichungen in die Klimamodelle zur exakten Vorhersage der globalen Erwärmung übernommen werden können. Dennoch führt die Wissenschaft die derzeitige globale Erwärmung auf die in den letzten 800.000 Jahren noch nie so hohe Konzentration an CO₂ in der Atmosphäre zurück. Der dadurch ausgelöste Temperaturanstieg in der Nähe der Erdoberfläche beträgt derzeit ungefähr 0,85 °C, gemittelt bis zum Jahr 1880. Über der Nordhalbkugel und der Arktis beträgt der Temperaturanstieg sogar über 1 °C. Während des gleichen Zeitraums ist der Meeresspiegel um knapp 20 cm im weltweiten Durchschnitt gestiegen.²²

Sollte die globale Erwärmung nicht gestoppt werden, könnte es auch zu einer Häufung extremer Wetterereignisse, eines noch schnelleren Meeresspiegelanstiegs oder einer Versauerung der Weltmeere kommen. Neben diesen ökologischen Phänomenen kann eine globale Erwärmung auch mit tiefen ökonomischen Einschnitten in den betroffenen Regionen einhergehen, was wiederum die globale Sicherheitslage verschlechtern kann. Es geht also um den Erhalt der über die letzten Jahrhunderte so günstigen und mehr oder weniger stabilen Lebensbedingungen auf unserer Erde.²³ Um die Erderwärmung auf ein erträgliches Maß zu begrenzen, wurde im November 1988 ein wissenschaftliches zwischenstaatliches Gremium unter dem Namen Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) gegründet. Das IPCC wurde von der Weltorganisation für Meteorologie (WMO) und dem Umweltprogramm der Vereinten Nationen (UNEP) ins Leben gerufen, um Entscheidungsträgern und anderen am Klimawandel Interessierten eine objektive Informationsquelle über Klimaänderungen zur Verfügung zu stellen. Das IPCC betreibt selbst keine Klimaforschung, es stellt aber den aktuellen Stand des Wissens dar, um daraus Handlungsempfehlungen für die Gesellschaft abzuleiten.²⁴ Eine Empfehlung ist die viel zitierte Halbierung der weltweit ausgestoßenen Treibhausgasemissionen bis zur Jahrhundertmitte im Jahr 2050, bezogen auf die Emissionswerte von 1990. Dadurch würde die globale Erwärmung nach heutiger Erkenntnis auf 2 °C reduziert werden.²⁵

Auf den Verkehr (weltweit) entfiel im Jahr 2010 ein Anteil von 22 Prozent der globalen CO₂-Emissionen. Damit ist er nach der Strom- und Wärme-Produktion (41 Prozent) der zweitgrößte Emittent, gefolgt von der Industrie mit 20 Prozent. Etwa zwei Drittel der Verkehrsemissionen entfallen auf den Straßenverkehr von Pkw, Lkw, Motorrädern und Bussen.²⁶ In Deutschland schwankt der Anteil, durch den Straßenverkehr verursachter CO₂-

²¹ Vgl. Emmermann (2008).

²² IPCC (2013a).

²³ Vgl. Latif (2012), S. 15f.

²⁴ IPCC (2013b).

²⁵ IPCC (2013a).

²⁶ IEA (2012).

Emissionen an den Gesamtemissionen, in den vergangenen 20 Jahren mehr oder weniger unverändert zwischen 17 bis 20 Prozent.²⁷ Derzeit gelten aber weder für den Verkehr noch für einen anderen Sektor weltweit einheitliche und verbindliche Vorschriften die zu einer Verringerung der CO₂-Emissionen führen sollen. In den verschiedenen Ländern wurden in den vergangenen Jahrzehnten aber zahlreiche gesetzliche Rahmenbedingungen in Form von regulatorischen und fiskalpolitischen Instrumenten verankert, die die CO₂-Emissionen bis zum Jahr 2050 signifikant reduzieren sollen. Auf diese Rahmenbedingungen wird im Gliederungspunkt 2.1.3 „Gesetzliche Rahmenbedingungen“ näher eingegangen.

2.1.2 Energieversorgung und Energieverbrauch des Verkehrs²⁸

Die Versorgung der Menschheit mit Energie stellt seit jeher einen wichtigen Baustein zur menschlichen Daseinsvorsorge dar. Sie ist notwendig zur Nahrungszubereitung, zum Wohnen, zum Transport, zur Kommunikation, in Industrie und Technik und zur Freizeitgestaltung. Dabei sind die natürlich vorkommenden Energieträger und der Energiebedarf weltweit ungleich verteilt.²⁹ Energieträger können in fossile und erneuerbare Energieträger unterteilt werden. Fossile Energieträger sind über erdgeschichtlich sehr lange Zeiträume als Abbauprodukte von Pflanzen und Tieren unter besonderen geologischen Bedingungen entstanden. Zu ihnen zählt man Erdöl, Erdgas, Braunkohle und Steinkohle. Erneuerbare Energien sind erdgeschichtlich viel jünger und verhältnismäßig schnell erneuerbar. Zu ihnen zählen Windenergie, Sonneneinstrahlung, Wasserkraft, Erdwärme, Müll und nachwachsende Rohstoffe.

In Deutschland entfällt ein Großteil des Primärenergieverbrauchs³⁰ auf fossile Energieträger, wenngleich der Anteil an erneuerbaren Energien am Primärenergieverbrauch von 1990 bis 2012 von einem Prozent auf zwölf Prozent gestiegen ist (Abbildung 4, links). Der gesamte Primärenergieverbrauch ist von 1990 bis 2012 um 7,7 Prozent gesunken. Auf den Verkehrssektor³¹ entfiel im Jahr 2012 ein Anteil von 19 Prozent am Primärenergieverbrauch in Deutschland. Damit ist der Verkehrssektor neben den Haushalten der Sektor, der in den letzten Jahren mehr Energie verbraucht hat (Abbildung 4, rechts). Die Gründe dafür werden im Gliederungspunkt 2.1.4 Gesellschaft und Verkehrsmittelwahl näher erläutert.

Im Jahr 1990 stammte fast die gesamte erneuerbare Stromerzeugung in Deutschland mit 20 TWh/a aus der Wasserkraft. Mit der Einführung des Stromeinspeisungsgesetzes und dem nachfolgenden Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG) verfünffachte sich die erneuerbare Stromerzeugung nahezu bis zum Jahr 2012. Der Ausbau basierte insbesondere auf Windkraftanlagen an Land (51 TWh/a in 2012) und Photovoltaik (26 TWh/a in 2012). Die Wasserkraft hat sich mit 22 TWh/a (2012) nur unwesentlich vergrößert. Windkraftanlagen auf See sowie Strom aus Geothermie kommen im Jahr 2012 zusammen nur auf einen Anteil von unter 1 TWh/a. Das langfristig, technisch-nachhaltig erzeugte Strompotenzial schwankt in verschiedenen Studien nach Kreyenberg et al. (2015) zwischen 400 TWh/a und 4.000 TWh/a.

²⁷ Eigene Auswertung von 1992 bis 2012 aus BMWI (2013b).

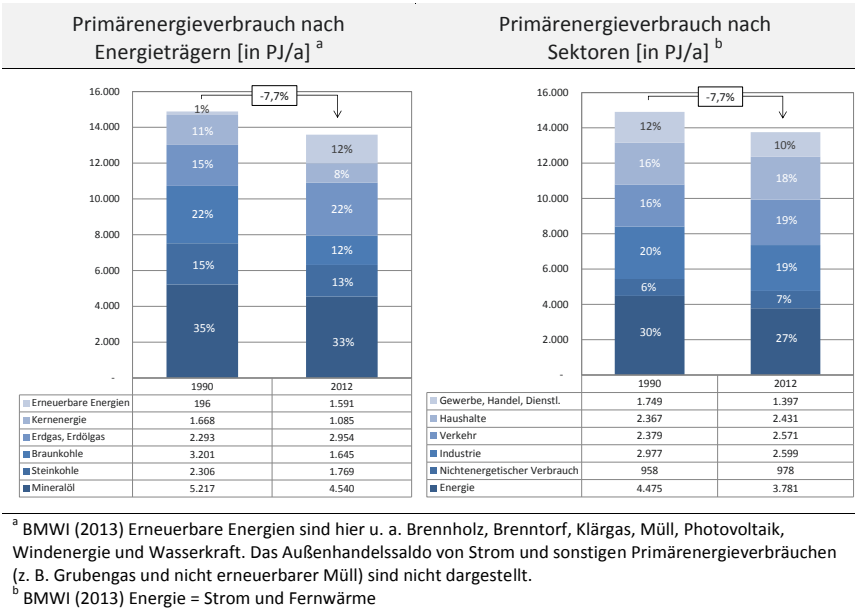
²⁸ Dieser Abschnitt basiert im Wesentlichen auf Kreyenberg, Lischke, et al. (2015), S. 20 ff.

²⁹ Vgl. Zahoransky (2007), S. 1.

³⁰ Als Primärenergien werden alle Energiearten (Stoffe und Prozesse) bezeichnet, die von der Natur bereitgestellt und vom Menschen genutzt werden. Ziesing, Görgen, et al. (2012) S. 16.

³¹ Der Energieverbrauch des Verkehrs umfasst die Sektoren Schienenverkehr, Straßenverkehr, Luftverkehr sowie die Küsten- und Binnenschifffahrt. Ziesing, Görgen, et al. (2012) S. 30.

Hier wird im Weiteren, wie in der eben zitierten Studie, von einem langfristig, technisch-nachhaltigen Stromerzeugungs-Potenzial von 1.000 TWh/a für Deutschland ausgegangen.³²



In einer Analyse mit realistischeren Annahmen zum Fahrzeugverbrauch in verschiedenen Pkw-Segmenten und unterer Berücksichtigung der weiteren Verkehrsträger (Schiene, Schiff, Flugzeug, Lkw) mit dem Flottenmodell TREMOD kommen Kreyenberg et al. in unterschiedlichen Szenarien auf eine maximale Reduktion von 33 Prozent des Endenergiebedarfs im Verkehr für bis zum Jahr 2050 (im Vergleich zu 2010). Der Pkw-Verkehr kompensiert dabei schon die erwarteten Steigerungsraten des Verkehrsaufkommens von Flugzeugen und Lkw.³⁵

Um den Energieverbrauch einer Gesellschaft weiterhin nachhaltig zu senken, müssen neben der Hebung von Verbrauchs- und den Einsparpotenzialen in den jeweiligen Sektoren auch andere Einflussfaktoren wie die Energieinfrastruktur näher beleuchtet werden. An dieser Stelle ist die Infrastrukturproblematik der bisher erst geringfügig vorhandenen Strom- und Wasserstofftankstellen erwähnenswert. Weiterhin muss das schwankende Angebot von erneuerbaren Energien im Netz, der dazu zukünftig nötige Ausbau der Netze und die Schaffung von geeigneten Energiespeichern näher untersucht werden.³⁶ Weitere wichtige Einflussfaktoren auf den Energieverbrauch bzw. die Energieversorgung sind Witterung, Bevölkerungsentwicklung, Haushaltsgröße, Siedlungs- und Verkehrsstruktur, Konjunktur, Energiepreise, Industriestruktur, Energieproduktivität und rechtliche Rahmenbedingungen.³⁷

Tabelle 2: Erneuerbares Strompotenzial für den Pkw-Verkehr³⁸

Kraftstoff	Kraftstoffpotenzial ‚ceteris paribus‘			Anzahl Pkw ‚ceteris paribus‘			
	η^a	Potenzial ^b „100 TWh“	Potenzial ^c „465 TWh“	Antrieb	Verbrauch ^d	Anzahl Pkw ^e „100 TWh“	Anzahl Pkw ^e „465 TWh“
Strom	89 %	89 TWh/a	415 TWh/a	BEV	0,15 kWh/km	41 Mio.	191 Mio.
Wasserstoff	58 %	58 TWh/a	268 TWh/a	FCEV	0,21 kWh/km	18 Mio.	86 Mio.
CNG	41 %	41 TWh/a	191 TWh/a	ICE-CNG	0,59 kWh/km	5 Mio.	22 Mio.
Benzin	35 %	35 TWh/a	163 TWh/a	ICE-G	0,57 kWh/km	4 Mio.	19 Mio.
Diesel	35 %	35 TWh/a	163 TWh/a	ICE-D	0,45 kWh/km	5 Mio.	24 Mio.

^a Wirkungsgrad zur Kraftstoffherstellung und Distribution, Wasserstoffherstellung über Elektrolyse, CNG-Herstellung über Methanisierung, Benzin- und Diesel-Herstellung über Methanolsynthese. Siehe Kreyenberg, Lischke et al. (2015), S. 57.

^b auf Basis des erneuerbaren Strompotenzials von 100 TWh/a im Jahr 2012.

^c auf Basis des technisch möglichen erneuerbaren Strompotenzials von 1.000 TWh/a minus der Stromnachfrage im Jahr 2012 von 535 TWh/a = 465 TWh/a.

^d NEFZ-Verbräuche der 2010er Fahrzeuge nach JEC (2013).

^e Pkw-Laufleistung: 15.000 km/a.

Aus volkswirtschaftlicher Sicht trägt die Energieversorgung auch maßgeblich zum Wohlstand einer Gesellschaft bei. Dabei lassen sich (I) Versorgungssicherheit (II) Preisentwicklung

³⁵ Vgl. Kreyenberg, Lischke, et al. (2015), S. 16ff.

³⁶ Stolzenburg, Hamelmann, et al. (2014).

³⁷ Aus BMWI (2013a) und BMWI (2012).

³⁸ Vgl. Kreyenberg, Lischke, et al. (2015), S. 16.

(III) Energieeffizienz und (IV) Emissionsminderung als die wichtigsten und nachhaltigsten Kriterien zukünftig erfolgreicher Energiepolitik identifizieren.³⁹

Der Verkehrssektor kann durch die oben skizzierten Zusammenhänge als integrativer Bestandteil der Energiewende gesehen werden. In ihm finden die Produzenten von erneuerbaren Energien einen Abnehmer, der mit den entsprechenden Technologien diese auch sehr energieeffizient nutzen kann. Zwingende Voraussetzung dafür ist die weitere Elektrifizierung der Fahrzeugflotte und die Bereitstellung von erneuerbaren Energien für den Verkehr mit der entsprechenden Infrastruktur.⁴⁰

2.1.3 Gesetzliche Rahmenbedingungen⁴¹

Um die im Punkt 2.1.1 erläuterten Klimaschutzziele zu erreichen, bedienen sich die Europäische Union und Deutschland verschiedenster regulatorischer und fiskalpolitischer Instrumente.⁴² Tabelle 3 zeigt die wichtigsten regulatorischen, gesetzlichen und fiskalpolitischen Instrumente, die installiert wurden, um den Energieverbrauch und die Treibhausgasemission im deutschen Pkw-Verkehr zu reduzieren. Außerdem werden ausgewählte Instrumente anderer Länder dargestellt und im Weiteren diskutiert.

Energie-/Mineralölsteuer: Die Mineralölsteuer wird in Deutschland nach dem Energiesteuer-gesetz (EnergieStG), welches die Besteuerung fossiler Energieträger (Mineralöle, Gase und Kohle) und nachwachsender Energieträger (Pflanzenöle, Biodiesel, Bioethanol) regelt, erhoben. Die Mineralölsteuer ist eine Verbrauchssteuer, die über den Warenpreis auf die Verbraucher umgelegt wird. Dabei werden die einzelnen Kraftstoffe für den Straßenverkehr unterschiedlich stark besteuert. Der Unterschied zwischen Dieselmotorkraftstoff und Benzin beträgt derzeit 0,18 EUR/l.⁴³ Dieser Unterschied wird oft als versteckte Subvention gesehen und war ursprünglich der Schonung des gewerblichen Straßengüterverkehrs gedacht. Die Mineralölsteuer wird als eines der wichtigsten Instrumente zur Beeinflussung des Energieverbrauchs und der durch den Straßenverkehr verursachten Emissionen gesehen. In diesem Zusammenhang wird sie als Instrument zur Reduzierung der Fahrleistungen als auch als Instrument zur langfristigen Verbrauchsreduzierung von Pkw-Antrieben gesehen.⁴⁴

Ökosteuer: Die Ökosteuer ist eine Energiesteuer auf Brenn- und Treibstoffe sowie Strom. Unter dem Begriff Ökosteuer wurden ab dem Jahr 1999 eine Reihe steuerpolitischer Maßnahmen gruppiert, die alle die Besteuerung des knappen Gutes Energie mit dem Ziel der Effizienzsteigerung haben. Im Wesentlichen besteht die Ökosteuer aus der Stromsteuer und einem Aufschlag zur Mineralölsteuer bzw. Energiesteuer. Strom- und Energiesteuer sind Mengensteuern. Auf Strom entfallen durch die Ökosteuer 0,02 EUR/kWh, auf Benzin und Diesel entfallen 0,15 EUR/l.⁴⁵

³⁹ Statistisches Bundesamt (2009).

⁴⁰ Vgl. Kreyenberg, Lischke, et al. (2015), S. 138.

⁴¹ Dieser Abschnitt basiert im Wesentlichen auf Kreyenberg, Lischke, et al. (2015), S. 31 ff.

⁴² Vgl. dazu Kreyenberg, Lischke, et al. (2015) und im speziellen KOM (2011); Bundesregierung (2010); EU (2009a) 2009/28/EG; EU (2009b) 2009/30/EG; BImSchG (2009) § 37a.

⁴³ EnergieStG (2012). Das EnergieStG hat das Mineralölsteuergesetz (MinÖStG) im Jahr 2006 abgelöst. Benzin (gleich welcher Sorte) wird mit einer Mineralölsteuer von 0,65 EUR/l und Diesel mit 0,47 EUR/l besteuert.

⁴⁴ Mehlin, Nobis, et al. (2002), S. 53.

⁴⁵ IHK (2013).

Tabelle 3: Einfluss verschiedener regulatorischer, gesetzlicher und fiskalpolitischer Instrumente auf Energieverbrauch, THG-Emissionen und Anteil EE im Verkehr

				Einfluss auf Energieverbrauch und THG-Emissionen im Verkehr		Einfluss auf Anteil Erneuerbare Energien im Verkehr
	Instrument	Land	Zeitraum	wirkt auf Endkunde ^a	wirkt auf Anbieter ^b	
Kraftstoff	Energie-/Mineralölsteuer ^c	DE	seit 1930	X	O	-
	Ökosteuer ^d	DE	seit 1999	X	O	-
	Beimischung von Biokraftstoffen ^e	DE	seit 2004	X	X	X
	Erneuerbare-Energien-Gesetz ^f	DE	seit 2000	-	O	O
	Emissionshandel ^g	DE	seit 2005	O	X	O
	Dienstwagen Besteuerung ^h	DE	seit 2006	X	O	-
Fahrzeug	Kfz-Steuer ⁱ	DE	seit 2009	X	O	-
	EU-Flottengrenzwerte ^j	DE	seit 2012	O	X	-
	Umweltprämie ^k	DE	2009 - 2010	X	O	-
	Elektromobilitätsgesetz ^l	DE	seit 2015	X	O	-
	Kaufprämien ^m	FR, NOR	seit 2008	X	O	-
	Maut- und Parkgebühren ⁿ	DE, GB	seit 2003	X	O	-
	ZEV-Gesetzgebung ^o	USA	seit 1990	O	X	-

^a Fahrzeugkäufer, Fahrer

^b OEM, EVU, Mineralölwirtschaft

^c EnergieStG (2012)

^d EnergieStG (2012) § 2 und StromStG (2012) § 3

^e BImSchG (2013) und BImSchV (2010)

^f EEG (2000)

^g TEHG (2011)

^h EStG (2013) §6

ⁱ KraftStG (2012)

^j EU (2009) 443/2009

^k BAFA (2009)

^l DeutscherBundestag (2014)

^m ACEA (2013)

ⁿ IEA (2013)

^o ARB (2008)

Legende: X = Direkte Wirkung

O = Indirekte Wirkung

- = Keine Wirkung

Beimischung von Biokraftstoffen: In den letzten Jahren hatte Biodiesel den mit Abstand größten Anteil von Biokraftstoffen⁴⁶ im Verkehr. Dieser erreichte durch die Mineralölsteuerbefreiung von reinem Biodiesel im Jahr 2007 seinen vorläufigen Höhepunkt, mit einem Marktanteil von 7,4 Prozent.⁴⁷ Die Steuerbefreiung wurde bis Januar 2013 fast vollständig zurückgefahren, wodurch sich die Kosten von Biodiesel konventionellem Diesel nahezu angeglichen haben.⁴⁸ Dadurch ist Biodiesel in Reinform ab dem 01.01.2013 praktisch nicht mehr als Kraftstoff interessant. Im Gegenzug wurde aber durch die gesetzliche Regel zur Beimischung von Biodiesel zu herkömmlichen Diesel (B7) immerhin noch 70 Prozent der im

⁴⁶ Als Biokraftstoffe werden hier Biodiesel, Bioethanol und Pflanzenöl gesehen.

⁴⁷ Adolf, Fehrenbach, et al. (2013), S. 125.

⁴⁸ EnergieStG (2012). Ab 01.01.2013 beträgt die Energiesteuer für Biodiesel und Pflanzenöl 0,45 EUR/l.

Jahr 2007 abgesetzten Menge an Biodiesel im Jahr 2012 abgesetzt. Bioethanol in Benzin als E5- bzw. E10-Gemisch trägt seit 2004 immer mehr zum Biokraftstoffabsatz in Deutschland bei. Im Jahr 2012 betrug der Bioethanol-Anteil am gesamten Biokraftstoffabsatz 27 Prozent. Der Anteil der Biokraftstoffe am gesamten Kraftstoffabsatz in Deutschland lag im Jahr 2012 bei 5,5 Prozent.⁴⁹

Erneuerbare-Energien-Gesetz: Das Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG) steuert seit dem Jahr 2000 den Ausbau an erneuerbaren Energien in Deutschland. Die grundlegenden Strukturelemente des EEG sind (I) Die Verpflichtung der Netzbetreiber zum Netzanschluss und gegebenenfalls Netzausbau für EEG-Anlagen (II) Der Einspeisevorrang von erneuerbarem Strom gegenüber Strom aus konventionellen Energieträgern (III) Die Vergütung des erneuerbaren Stroms zu einem festen Vergütungssatz (in der Regel über 20 Jahre). Die Höhe des Vergütungssatzes ist technologie- und standortspezifisch (bei Windenergie) verschieden und wird im Laufe der Jahre immer wieder angepasst. Mit der EEG-Umlage werden die sich daraus ergebenden Kosten auf die Stromendverbraucher verteilt. Auf Antrag können sich bestimmte Stromnutzer von der EEG-Umlage befreien lassen. Die Höhe der EEG-Umlage wird jedes Jahr neu berechnet. Sie ergibt sich aus dem Unterschied zwischen den Einnahmen aus dem Stromverkauf an der Strombörse (Sportmarkt, Merit Order) und den Ausgaben zur Vergütung der Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien. Dabei wirken die steigenden EE-Beiträge im Mittel dämpfend auf die Strompreise am Spot- und Base-Markt. Im Jahr 2012 lag die EEG-Umlage für den Haushaltsstrompreis bei 3,6 ct/kWh.⁵⁰ Seit Inkrafttreten des EEG in Deutschland hat sich der erneuerbare Bruttostromverbrauch von 6,4 Prozent im Jahr 2000 auf 16,8 Prozent im Jahr 2010 erhöht.⁵¹ Der für den Verkehr entnommene Netzstrom unterliegt somit indirekt auch dem EEG.

Emissionshandel: Der Emissionshandel ist ein marktbasiertes Instrument, das dafür sorgen soll, dass sich am Markt ein Preis für Treibhausgas-Emissionen (THG) bildet.⁵² In Deutschland ist der Emissionshandel über das Treibhausgas-Emissionshandelsgesetz (TEHG) geregelt.⁵³ Pro ausgestoßener Tonne THG wird dabei für Anlagen der Stromerzeugung und der Industrie ein Berechtigungsschein (Emissionszertifikat) ausgegeben. Die Summe an Zertifikaten entspricht der Summe der durch den Gesetzgeber⁵⁴ in dem Zeitraum festgelegten Ausstoßmengen an THG-Emissionen in die Atmosphäre. Stößt ein Unternehmen weniger THG aus, kann es die Zertifikate an ein Unternehmen verkaufen, das mehr THG emittiert, als es Zertifikate besitzt. Für alle emittierten THG, die über der vorher definierten Gesamtmenge liegen, werden Ausgleichszahlungen fällig. Die Einnahmen aus dem Verkauf der Zertifikate und den Ausgleichszahlungen stehen laut THG dem Bund als Sondervermögen des Energie- und Klimafonds zur Verfügung.⁵⁵ Die Produzenten des Netzstroms für den Verkehr sind durch den

⁴⁹ BMU (2013), S. 8.

⁵⁰ BMU (2012), S. 6.

⁵¹ Vgl. BMU (2011), S. 3f.

⁵² Die Verpflichtungen betreffen die folgenden sieben Treibhausgase: Kohlendioxid (CO₂), Methan (CH₄), Distickstoffoxid/Lachgas (N₂O), Teilhalogenierte Fluorkohlenwasserstoffe (H-FKW/HFC), Perfluorierte Kohlenwasserstoffe (FKW/PFC), Schwefelhexafluorid (SF₆), Stickstofftrifluorid (NF₃).

⁵³ TEHG (2011).

⁵⁴ In Europa: European Union Emission Trading System (EU ETS).

⁵⁵ Vgl. Schachtschneider (2013), S. 6ff. Aus den Einnahmen des Energie- und Klimafonds ist zukünftig auch eine monetäre Förderung der Elektromobilität vorstellbar.

Emissionshandel somit zukünftig gezwungen, entweder die THG-Emissionsgrenzwerte einzuhalten oder durch den Zukauf von Zertifikaten andere klimafreundliche Technologien zu fördern. Die Lenkungswirkung des Emissionshandels hängt von den THG-Emissionsgrenzen in den Handelsrunden und der Höhe und Verwendung der Ausgleichszahlungen ab.

Dienstwagen-Besteuerung: In den letzten Jahren wurden in Deutschland weit über die Hälfte der Pkw-Neuzulassungen von Unternehmen, öffentlichen Einrichtungen und sogenannten freien Berufen als Firmenwagen durchgeführt.⁵⁶ Ein Großteil dieser Firmenwagen⁵⁷ steht den Arbeitnehmern auch privat zur Verfügung. Der ihnen daraus entstehende geldwerte Vorteil muss entweder pauschal, mit einem Prozent des Anschaffungs-Listenpreises jeden Monat zum steuerpflichtigen Einkommen dazugerechnet und versteuert werden oder anhand der tatsächlichen Kosten mittels eines dann zu führenden Fahrtenbuches. Das Finanzwirtschaftliche Forschungsinstitut der Universität Köln sieht in seiner Studie „Steuerliche Behandlung von Firmenwagen in Deutschland“⁵⁸ einen Zusammenhang, der für die Arbeitnehmer vergleichsweise günstigen Ein-Prozent-Regelung und der Anschaffung größerer, klimaschädlicher Fahrzeuge. Laut Studie schafft diese Regelung damit Anreize zur Verlagerung des Mobilitätsverhaltens auf die Straße und zur übermäßigen privaten Nutzung, da die tatsächliche Fahrleistung bei der Ein-Prozent-Regel nicht besteuert wird. Für die Unternehmen wird die volle Absetzbarkeit der Anschaffungs- und Betriebsausgaben der Dienstwagen ebenfalls als falscher Anreiz für energie- und emissionsarme Fahrzeuge gesehen.⁵⁹ Für die derzeit noch vergleichsweise teureren alternativen Antriebe würde die Ein-Prozent-Regel sogar einen Nachteil bedeuten, da mit höherem Listenpreis auch der zu versteuernde Privatanteil steigt. Der Gesetzgeber hat deshalb für BEV, REEV und PHEV eine Regelung erlassen, bei der die Batteriekosten dieser Fahrzeuge gestaffelt bis höchstens 10.000 EUR vom Anschaffungspreis abgezogen werden. Die Batteriekosten errechnen sich aus einem festen Kostensatz von 500 EUR/kWh (bis 31.12.2013), der dann jährlich um 50 EUR/kWh erniedrigt wird.⁶⁰ Eine Regelung für Brennstoffzellenfahrzeuge befindet sich noch in der Diskussion.

Kfz-Steuer: Mit der Zulassung eines Fahrzeugs zum Straßenverkehr muss der Fahrzeughalter in Deutschland für dieses eine Kfz-Steuer auf Jahresbasis entrichten. Die Kfz-Steuer bemisst sich bei Pkw mit einem Hubkolben-Verbrennungsmotor ab dem 01.07.2009 nach den CO₂-Emissionen und dem Hubraum. Für Ottomotoren werden 2,00 EUR je angefangene 100 cm³ Hubraum und für Dieselmotoren 9,50 EUR je angefangene 100 cm³ Hubraum bemessen. Hinzu kommt ein CO₂-abhängiger Steuerbetrag von 2,00 EUR je Gramm CO₂ pro Kilometer im NEFZ.⁶¹ Für Fahrzeuge, die ausschließlich mit einem Elektromotor angetrieben werden, entfällt die Kfz-Steuer für zehn Jahre bei den Fahrzeugen, die zwischen dem 18.05.2011 und dem 31.12.2015 erstmals zugelassen wurden sowie werden und für fünf Jahre für Fahrzeuge, die zwischen dem 01.01.2016 und dem 31.12.2020 zugelassen werden.⁶²

⁵⁶ KBA (2013b).

⁵⁷ Als Firmenwagen werden hier alle nicht privat zugelassenen Fahrzeuge bezeichnet. Als Dienstwagen werden die Firmenwagen bezeichnet, die auch privat genutzt werden können.

⁵⁸ Thöne, Diekmann, et al. (2011).

⁵⁹ Vgl. Thöne, Diekmann, et al. (2011), S. 5f.

⁶⁰ Vgl. Bundesrat (2013), S. 16

⁶¹ Oberhalb eines steuerfreien Grenzwertes. Dieser liegt bis zum 31.12.2011 bei 120 g/km, ab dem 01.01.2012 bei 110 g/km und ab dem 01.01.2014 bei 95 g/km.

⁶² KraftStG (2012).

EU-Flottengrenzwerte: Im Vergleich zu dem Schadstoffausstoß von Kohlenstoffmonoxid (CO), Kohlenwasserstoffen (C_mH_n), Stickstoffoxiden (NO_x) und Feinstaub, welcher seit Anfang der 1970er Jahre in der EU reguliert wird, galten für die CO_2 -Emissionen von Pkw lange Zeit keine Grenzwerte.⁶³ Seit dem Jahr 1995 hat die europäische Kommission erstmals eine Strategie zur Minderung der CO_2 -Emissionen im Pkw-Verkehr angenommen. Diese beinhaltet (I) Die Selbstverpflichtung der Automobilhersteller zur Senkung der Emissionen (II) Bessere Informationen für die Verbraucher (III) Die Förderung von Fahrzeugen mit niedrigeren Kraftstoffverbrauch durch steuerliche Maßnahmen. Die in Punkt (I) genannte Selbstverpflichtung wurde ab dem 01.01.2012 mit der Verordnung (EG) Nr. 443/2009 für alle Hersteller, die in Europa Fahrzeuge verkaufen, bindend.⁶⁴ Durch die Verordnung werden Flottengrenzwerte neu zugelassener Pkw in der EU für jeden Hersteller definiert. Dieser herstellerspezifische Grenzwert hängt vom durchschnittlichen Gewicht der Neufahrzeugflotte und dem Durchschnittsgewicht der gesamten europäischen Neufahrzeugflotte ab. Der Durchschnittswert pro abgesetztem Fahrzeug liegt im Jahr 2015 bei $130\text{ gCO}_2/\text{km}$.⁶⁵ Dieser verringert sich bis 2020 auf $95\text{ gCO}_2/\text{km}$. Pkw, die weniger als $50\text{ gCO}_2/\text{km}$ emittieren, werden mehrfach angerechnet.⁶⁶ Mit diesen Maßnahmen soll zum einen die Erhöhung der Effizienz konventioneller Fahrzeuge und zum anderen der Anteil von alternativen Antrieben in der europäischen Flotte erhöht werden. Bei Nichteinhaltung der Verordnung werden Strafzahlungen in Abhängigkeit der Zielverfehlung für die Automobilhersteller fällig.⁶⁷ Die genaue Ausgestaltung der Verordnung und Umsetzung ist aktuell noch in der Diskussion. Auch die Wirkung der Verordnung auf die tatsächliche Einsparung an Energie und Treibhausgasen im Pkw-Verkehr wird derzeit noch kritisch diskutiert.

Umweltprämie: Die Umweltprämie wurde in Deutschland als Teil des Konjunkturpaketes II für die Verschrottung eines Kraftfahrzeugs und die Neuzulassung eines Neu- bzw. Jahreswagens in Höhe von 2.500 EUR zwischen dem 14.01.2009 und dem 30.06.2010 gewährt. Die Umweltprämie sollte zum einen den durch die Finanzkrise rückläufigen Absatz von Pkw wieder beleben; zum anderen sollten alte Fahrzeuge mit einem hohen Verbrauch und hohen CO_2 - und Schadstoffemissionen durch effizientere, schadstoffärmere Fahrzeuge ersetzt werden.⁶⁸ Das ifeu-Institut aus Heidelberg kommt in seiner Studie „Umweltprämie und Umwelt – eine erste Bilanz“⁶⁹ zu dem Schluss, dass durch die Umweltprämie vor allem ältere Fahrzeuge, die sowieso kurz vor der Ersetzung standen, ersetzt wurden.⁷⁰ Diese Fahrzeuge unterlagen aufgrund ihres Alters noch keiner bzw. einer geringen Schadstoffregulierung. Die neuen Fahrzeuge wiesen eine signifikant bessere Energieeffizienz auf, mit deutlich verbesserten Schadstoffemissionen. Somit kann durch die Umweltprämie ein positiver Effekt auf

⁶³ Vgl. Wansert (2012), S. 19.

⁶⁴ EU (2009c).

⁶⁵ Dieser Wert beruht auf einem Normzyklus, dem Neuen Europäischen Fahrzyklus (NEFZ). Eine ausführliche Diskussion über den NEFZ findet sich im Gliederungspunkt 4.3 Tank-to-Wheel Energieverbrauch von alternativen Antrieben.

⁶⁶ Diese Möglichkeit wird auch als Supercredits bezeichnet. Derzeit steht in der Verordnung eine Staffelung von 3,5 Fahrzeuge im Jahr 2012; 3,5 Fahrzeuge im Jahr 2013; 2,5 Fahrzeuge im Jahr 2014; 1,5 Fahrzeuge im Jahr 2015; 1 Fahrzeug ab 2016.

⁶⁷ Vgl. Peters, Doll, et al. (2012), S. 118ff.

⁶⁸ BAFA (2009).

⁶⁹ Höpfner, Hanusch, et al. (2009).

⁷⁰ Das Durchschnittsalter lag im Untersuchungszeitraum bei 14,4 Jahren.

die Umwelt durch den Betrieb der Fahrzeuge attestiert werden, wenngleich die Aufwendungen für die Herstellung und Entsorgung nicht bilanziert wurden.⁷¹

Elektromobilitätsgesetz: Das Elektromobilitätsgesetz (EmoG) soll die Verbreitung von elektrisch betriebenen Fahrzeugen fördern. Durch das Gesetz bekommen Kommunen das Recht, Elektrofahrzeugen (BEV, FCEV, REEV und PHEV⁷²) Sonderrechte im öffentlichen Raum einzuräumen. Dazu zählen Parkbevorrechtigungen und Parkgebührenbefreiungen sowie eine dafür erforderliche Kennzeichnung der Fahrzeuge. Außerdem können gesonderte Fahrspuren (zum Beispiel Busspuren) für Elektrofahrzeuge freigegeben werden. Das Gesetz ist bis 2026 befristet und nicht verpflichtend.⁷³ Eine verbindliche Anwendung der Kommunen ist also nicht vorgeschrieben. Es schafft lediglich die rechtliche Legitimation, um Elektrofahrzeuge bevorzugt zu den restlichen Pkw zu behandeln.

Kaufprämien: In Deutschland gibt es derzeit kein Instrument, was den Kauf von Elektrofahrzeugen finanziell bezuschusst. Generell wäre diese Förderung als Mehrwertsteuer-Erlass oder als direkte Kaufprämie (ähnlich einer Umweltprämie) vorstellbar. In Europa sind Norwegen und Frankreich die populärsten Märkte mit einer Kaufprämie. In Frankreich wird der Kauf eines Fahrzeugs seit dem Jahr 2008 nach einem Bonus-Malus-System besteuert. Fahrzeugkäufer, die ein Auto mit einem CO₂-Ausstoß von weniger als 20 gCO₂/km anschaffen, bekommen den maximalen Bonus von 7.000 EUR. Dieser Bonus wird bis zu einer Emission von 110 gCO₂/km kontinuierlich geringer.⁷⁴ Fahrzeuge, die über 135 gCO₂/km emittieren, werden mit einem Malus von 100 EUR belegt. Dieser Malus wird gestaffelt größer und beträgt ab 231 gCO₂/km schon 6.000 EUR.⁷⁵ In Norwegen wird der Kauf eines Elektrofahrzeugs mit dem Erlass der Mehrwertsteuer von 25 Prozent belohnt. Außerdem entfallen die sonst üblichen Einfuhrsteuern von Pkw bei Elektrofahrzeugen.⁷⁶ Beim Kauf eines VW e-up beträgt der Prämienvorteil zwischen Norwegen und Deutschland insgesamt über 9.000 EUR.⁷⁷ Während der Kaufprämie in Norwegen eine große Wirkung auf den Absatz von Elektrofahrzeugen zugesprochen wird, ist ihre Wirkung in Frankreich jedoch noch sehr gering. Hier sind zukünftig weitere Forschungen wünschenswert.

Maut- und Parkgebühren: In Deutschland existierte vor dem EmoG keine Regelung, die Elektrofahrzeuge generell von Parkgebühren befreit. In Stuttgart können Besitzer von Elektrofahrzeugen aber einen Sonderparkausweis beantragen, der das gebührenfreie Parken im gesamten Stadtgebiet ermöglicht. In London entfällt für Elektrofahrzeuge die sogenannte „London congestion charge“ eine Innenstadtmaut mit einer Tagesgebühr von 10 GBP.⁷⁸ Eine weitere Möglichkeiten zur Förderung von Elektrofahrzeugen besteht in der Nutzung von Sonderfahrspuren, auf die hier nicht näher eingegangen wird.

ZEV-Gesetzgebung: Die ZEV-Gesetzgebung⁷⁹ hat ihren Ursprung im US-Bundesstaat Kalifornien. Das ZEV-Mandat aus dem Jahr 1990, wonach zehn Prozent aller Personenwagen (rund

⁷¹ Höpfner, Hanusch, et al. (2009).

⁷² Mit einem CO₂-Ausstoß kleiner/gleich 50 gCO₂/km und einer elektrischen Reichweite von mind. 40 km.

⁷³ Deutscher Bundestag (2014).

⁷⁴ ACEA (2013b).

⁷⁵ GTAI (2012).

⁷⁶ AVERE (2012).

⁷⁷ Schwarzer (2013).

⁷⁸ IEA (2013).

⁷⁹ Englisch: Zero Emission Vehicle (ZEV) regulation.

200.000 Stück) ab 2003 Nullemissionsfahrzeuge (Zero Emission Vehicles: ZEV) sein sollten, wird heute als Initialzündung der neueren Entwicklung von alternativen Antrieben gesehen. Als Reaktion auf das Gesetz haben bis Ende der 1990er Jahre alle großen OEM die Entwicklung von Batteriefahrzeugen vorangetrieben, welche danach durch die Entwicklung der aussichtsreicher erscheinenden Brennstoffzellenfahrzeuge ersetzt wurde.⁸⁰ Mittlerweile wurde das ursprüngliche Gesetz immer weiter verändert. So hat sich die kalifornische Behörde bereiterklärt, ein Punktesystem für emissionsarme Fahrzeuge einzuführen, weil sich das ursprüngliche Ziel als unerreichbar herausgestellt hat. In der aktuellen ZEV-Gesetzgebung errechnet sich der verbindliche Zielwert für die Absatzmenge von ZEV-Fahrzeugen eines Herstellers aus dem durchschnittlichen Absatz von konventionellen Fahrzeugen, multipliziert mit einem über die Jahre ansteigenden ZEV-Prozentsatz. Die Produktion und der Verkauf von Fahrzeugen mit alternativen Antrieben wird mit sogenannten ZEV-Credits belohnt. Diese ZEV-Credits werden einem Konto gutgeschrieben und verhindern bei einer entsprechenden Höhe Strafzahlungen des Herstellers an die Regierung.⁸¹ Aufgrund ihres Vorbildcharakters wurde die ZEV-Gesetzgebung bereits in zwölf weiteren US-Bundesstaaten implementiert.⁸²

Zusammenfassung und Diskussion

In der zusammenfassenden Analyse der untersuchten Instrumente fällt auf, dass eine Vielzahl der Instrumente auf den Endkunden (Fahrzeugkäufer und Fahrer) ausgerichtet sind. Die Anbieter von Fahrzeugen und Kraftstoffen werden bei den meisten Instrumenten bestenfalls indirekt zu handelnden. Die direkt auf die Anbieter wirkenden Instrumente wie die Beimischung von Biokraftstoffen, die EU-Flottengrenzwerte und die ZEV-Gesetzgebung zwingen die Anbieter jedoch zu einem direkten Handeln auf das jeweilige Instrument. Die Verwendung von erneuerbaren Energien im Verkehr wird bis auf die Gesetze zur Beimischung von Biokraftstoffen in keinen der bisher in Deutschland installierten und hier diskutierten Instrumente forciert. Neben der hier verwendeten Einteilung der Instrumente in direkte und indirekte Wirkung auf Endkunden und Anbieter erscheint eine Gliederung der Instrumente in die Kategorien (I) Forschung und Entwicklung (II) Verkauf und (III) Fahrzeugbetrieb für weitere Forschungen von Interesse.

Um aus den hier aufgezeigten Ansätzen Empfehlungen für eine zukünftige Förderpolitik von alternativen Antrieben zu geben, können die vorgestellten Instrumente nach Enzensberger und Wietschel (2003)⁸³ in zukünftigen Forschungen nach den Bewertungskriterien (I) Effektivität (II) Effizienz und (III) Praktikabilität bewertet werden. Ein effektives Instrument würde zum Beispiel die Anzahl von zusätzlich abgesetzten Elektrofahrzeugen oder die Menge der durch das Instrument vermiedenen CO₂-Emissionen messbar verändern. Mit dem Kriterium der Effizienz könnte man dann ermitteln, mit welchen Instrumenten diese Ziele am effizientesten, das heißt mit den geringsten Mitteleinsätzen erreicht werden können. Letztlich muss der Einsatz möglicher Förderinstrumente auf ihre politische und gesellschaftliche Praktikabilität und Akzeptanz geprüft werden. So könnten Instrumente, die zu viel administ-

⁸⁰ Vgl. Braess und Seiffert (2011), S. 112.

⁸¹ Vgl. Wansert (2012).

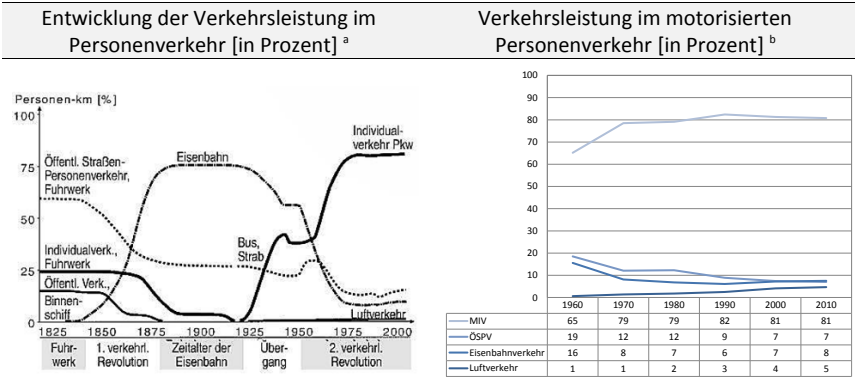
⁸² Vgl. Wallentowitz, Freialdenhoven, et al. (2010), S. 20.

⁸³ Enzensberger und Wietschel (2003), S. 36ff.

rativen Aufwand bedeuten, durch Ablehnung der Stakeholder sogar einen gegenteiligen Effekt bewirken, der bis zur Technologievermeidung gehen kann.

2.1.4 Gesellschaft und Verkehrsmittelwahl

Der Mensch hat von jeher das Bedürfnis, sich schneller, weiter und mit größeren Lasten bewegen zu können, und hat dafür bis heute die unterschiedlichsten Verkehrs- und Transportmittel erfunden.⁸⁴ Im volkswirtschaftlichen Kontext sind Staaten und Kulturen in einer globalisierten Welt sogar auf den räumlichen Austausch von Personen und Gütern angewiesen. Der Verkehr gewährleistet das Funktionieren eines solchen Austauschs und bildet dabei einen wichtigen Baustein zum zivilisatorischen, wirtschaftlichen und kulturellen Fortschritt einer Gesellschaft.⁸⁵ Der Personenverkehr unterlag in Deutschland in den letzten 200 Jahren gravierenden Veränderungen. Ende des 19. Jahrhunderts bis Mitte des 20. Jahrhunderts war die Eisenbahn das mit Abstand meist genutzte Verkehrsmittel. Mit der Entwicklung des Automobils, vor mehr als 125 Jahren, wurde ein individuelles und flexibles Verkehrsmittel geschaffen, welches den Personenverkehr seit Mitte des letzten Jahrhunderts dominiert (vgl. Abbildung 5, links). Die genaue Analyse der Verkehrsleistung im motorisierten Personenverkehr der letzten Jahre zeigt, dass der prozentuale Anteil des motorisierten Individualverkehrs (MIV) an der Verkehrsleistung seit den 1970er Jahren auf sehr hohem Niveau nahezu stagniert.⁸⁶ Der Anteil des öffentlichen Straßenpersonenverkehrs (ÖSPV) am Gesamtverkehr war in diesem Zeitraum stark rückläufig. Dafür konnte sich der Eisenbahnverkehr stabilisieren und der Luftverkehr nahezu verfünffachen (Vgl. Abbildung 5, rechts).



^a Braess und Seiffert (2011), S.1.
^b Eigene Auswertung aus BMVBS (2000), S. 218f. und BMVBS (2013), S. 220f.
Motorisierter Individualverkehr (MIV) = Pkw und motorisierte Zweiräder; Öffentlicher Straßenpersonenverkehr (ÖSPV) = Omnibus, Straßenbahn, U-Bahn; Eisenbahnverkehr = Nah- und Fernzüge einschl. S-Bahn

Abbildung 5: Entwicklung der Verkehrsleistung im Personenverkehr in Deutschland von 1820 bis 2010

⁸⁴ Vgl. Braess und Seiffert (2011), S. 1f.
⁸⁵ Vgl. Merki (2008), S. 8. und Vgl. Braess und Seiffert (2011), S. 1.
⁸⁶ Als MIV wird der Verkehr von Pkw und motorisierten Zweirädern bezeichnet, wobei heute in Deutschland nahezu die gesamte Verkehrsleistung des MIV auf den Pkw-Verkehr entfällt.

In absoluten Zahlen hat sich die Verkehrsleistung im motorisierten Personenverkehr (ÖV + MIV) von 556,4 Mrd. pkm im Jahr 1975 auf 1.117 Mrd. pkm im Jahr 2010 erhöht.⁸⁷ Bei einer Bevölkerungsgröße von 61,8 Mio. Einwohnern im Jahr 1975 entspricht das einer jährlich zurückgelegten Strecke von rund 9.000 km pro Einwohner im motorisierten Personenverkehr. Für die 81,8 Mio. im vereinigten Deutschland lebenden Menschen im Jahr 2010 hat sich diese Strecke auf rund 13.700 km/a pro Einwohner erhöht (Tabelle 4). Außerdem ist in Tabelle 4 der bisher unberücksichtigte nichtmotorisierte Verkehr von Fußgängern und Fahrradfahrern zu sehen. Im Jahr 1975 hat jeder Bürger in der BRD durchschnittlich 421 km/a zu Fuß zurückgelegt. Dieser Wert lag im Jahr 2010 nahezu unverändert bei 423 km/a. Die mit dem Fahrrad zurückgelegte Strecke hat sich von 1975 bis 2010 jedoch von 220 km/a auf 396 km/a signifikant erhöht.⁸⁸

Tabelle 4: Entwicklung der Verkehrsleistung im Personenverkehr in Deutschland von 1975 bis 2010

Jahr	Verkehrsleistung gesamt ^a					Verkehrsleistung pro Einwohner ^a				
	ÖV	MIV	Fuß- wege	Fahrrad	Bevöl- kerung	ÖV	MIV	Fuß- wege	Fahrrad	Summe
	[Mrd.pkm]	[Mrd.pkm]	[Mrd.pkm]	[Mrd.pkm]	[Mio.]	[km/a]	[km/a]	[km/a]	[km/a]	[km/a]
1975	115,3	441,1	26	13,6	61,8	1.865	7.134	421	220	9.639
2000	195,5	849,6	30	23,9	82,3	2.377	10.328	365	291	13.360
2010	214,9	902,4	34,6	32,4	81,8	2.629	11.038	423	396	14.486

^a Eigene Auswertung aus BMVBS (2000), S. 105 und S. 216; BMVBS (2013), S. 96, S. 219 und S. 224.

Öffentlicher Verkehr (ÖV) = ÖSPV + Eisenbahnverkehr + Luftverkehr

Die Wahl des Verkehrsmittels hängt dabei neben der technologischen Entwicklung auch von den Reisekosten, der Länge des Wegs, der Transportaufgabe und dem gewünschten Reisekomfort ab.⁸⁹ Die individuelle Mobilität einer Person ist aber auch eng verbunden mit der jeweiligen Lebenssituation, der vorliegenden Siedlungsstruktur und dem dort verfügbaren Angebot an öffentlichen Verkehrsmitteln. Bei durchschnittlich über 1.200 Wegen⁹⁰ pro Jahr und Person im Jahr 2010 legten Teilzeit-Erwerbstätige (≈ 1.500 Wege/a) rund doppelt so viele Wege zurück wie Rentner über 75 Jahre (≈ 750 Wege/a). Bei der zurückgelegten Wegstrecke im motorisierten Personenverkehr führen die Vollzeit erwerbstätigen die Statistik mit über 21.000 km/a pro Person an. Rentner und Kleinkinder liegen mit deutlich unter 10.000 km/a und Person am wenigsten Strecke zurück⁹¹. Betrachtet man die Entwicklung der fahrtzweckspezifischen Verkehrsleistung über alle Bevölkerungsgruppen und Verkehrsmittel,

⁸⁷ 1975 ohne die Bevölkerung der DDR. Die Einheit Personenkilometer (pkm) steht für das Produkt der transportierten Personen mit der von ihnen zurückgelegten Strecke.

⁸⁸ Eigene Auswertung aus BMVBS (2000) und BMVBS (2013).

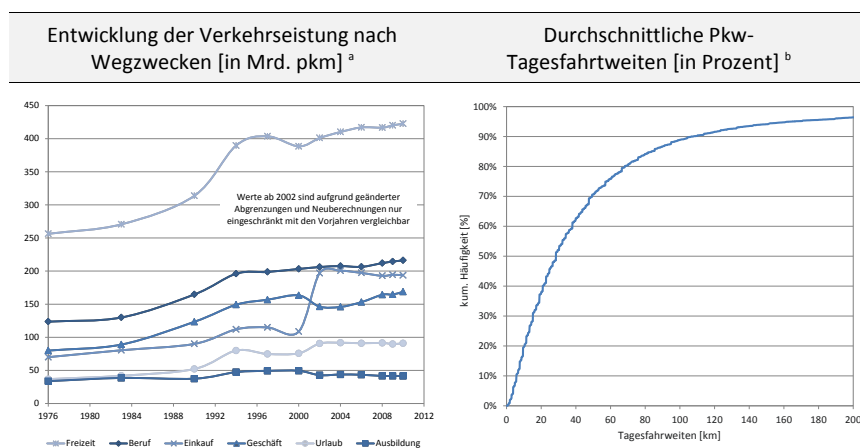
⁸⁹ Vgl. PWC (2012), S. 33.

⁹⁰ Das Kriterium für einen Weg ist die Aktivität am Zielort. In der für diese Analyse zugrunde liegende Datenquelle BMVBS (2013) wird unterschieden in Freizeit, Beruf, Einkauf, Geschäfts- und Dienstreise, Urlaub, Begleitung und Ausbildung.

⁹¹ Vgl. Kunert und Radke (2012), S. 4.

so ist festzustellen, dass in der Freizeit die mit Abstand meisten Personenkilometer zurückgelegt werden (Abbildung 6, links). Weiter untersuchenswert in dem Zusammenhang ist die Frage nach der Auslastung der benutzten Verkehrsmittel für diese Wege. Im Weiteren wird nur der Pkw-Besetzungsgrad diskutiert, obwohl für das gesamte Verkehrssystem auch die Auslastung der öffentlichen Verkehrsmittel von Interesse wären. Laut MiD (2008) sitzt bei fast zwei Drittel aller von Pkw zurückgelegten Inlandswege nur der Fahrer im Fahrzeug. Unter Zunahme der Mitfahrwege ergibt sich ein durchschnittlicher Pkw-Besetzungsgrad von 1,5 Personen pro Pkw im Jahr 2008. Dabei wiesen Geschäfts- und Arbeitswege die geringsten Besetzungsgrade (1,1 bzw. 1,2 Personen pro Pkw) auf. Die höchsten Besetzungsgrade wurden bei Freizeitwegen mit 1,9 Personen pro Pkw erzielt.⁹² Bei einem Sitzplatzangebot von in der Regel vier bis fünf Sitzplätzen in einem Pkw ist aber auch dieser Wert sehr gering.

Ein weiterer für den Einsatzzweck von alternativen Antrieben oft herangezogener Untersuchungsgegenstand ist die Verteilung der Pkw-Tagesfahrweiten nach deren Häufigkeit. Abbildung 6 (rechts) zeigt die durchschnittliche Pkw-Tagesfahrweite über ihre kumulierte Häufigkeit in Prozent. Ausgewertet wurden aus der Studie Mobilität in Deutschland (MiD) 2008 die Anzahl aller Fahrten mit dem Pkw und deren dazugehöriger Weglänge.⁹³



^a BMVBS (2013), S. 225. Nicht dargestellt ist der Wegzweck Begleitung. Dieser macht im Jahr 2010 60 Mrd. pkm aus.

^b MiD-Auswertung aus infas und DLR (2008), ausgewertet wurden 16.546 Fahrten

Abbildung 6: Entwicklung der Verkehrsleistung nach Wegzwecken und durchschnittlichen Pkw-Tagesfahrweiten

⁹² infas und DLR (2008), S. 90f.

⁹³ Weitere Informationen zur Studie Mobilität in Deutschland (MiD) 2008 finden sich im Gliederungspunkt 2.2.2 Fahrleistung.

Daraus lässt sich zum Beispiel ablesen, dass rund 80 Prozent aller Fahrten eine Tagesfahrweite von kleiner als 60 km haben, was in verschiedenen Studien wiederum ein Beleg dafür zu sein scheint, dass ein Großteil der Pkw-Tagesfahrweiten schon heute innerhalb der begrenzten Reichweite von batterieelektrischen Antrieben liegt.⁹⁴ Nähere Untersuchungen dazu finden im Gliederungspunkt 4.3 Tank-to-Wheel-Energieverbrauch (TtW) von Elektrofahrzeugen statt.

Wie sich das Mobilitätsbedürfnis der Menschen in Deutschland zukünftig auf die verschiedenen Verkehrsträger verteilt, ist schwer vorherzusehen und soll nicht Gegenstand dieser Arbeit sein. Vor dem Hintergrund des demografischen Wandels, steigender Kraftstoffpreise und eines durch technologische Möglichkeiten breiteren Angebots unterschiedlicher Mobilitätsoptionen⁹⁵ ist davon auszugehen, dass zum Beispiel der Pkw-Besetzungsgrad und die Verkehrsmittelwahl zukünftig von besonderem Interesse für weitere Forschungen sind.

2.1.5 Geschäftsmodelle und Mobilitätsoptionen

Lange Zeit war der Verkauf von Pkw an den Endkunden das bestimmende Geschäftsmodell der Automobilhersteller. In den letzten Jahren haben sich die Finanzierung von Pkw und der Handel mit Ersatzteilen als ebenso wichtige Ertragssäulen bei allen Automobilherstellern etabliert.⁹⁶ In der jüngeren Vergangenheit entwickeln sich Carsharing-Angebote wie car2go oder DriveNow in städtischen Gebieten immer mehr. Deutschland ist im Jahr 2012 nach den USA der Markt mit den am meisten angemeldeten Carsharing-Nutzern.⁹⁷ Hierzulande teilen sich im Schnitt 39 Nutzer ein Fahrzeug. Den niedrigsten Wert im internationalen Vergleich verzeichnet Tschechien mit sieben Nutzern/Fahrzeug und den höchsten Israel mit 72 Nutzern/Fahrzeug.⁹⁸ Zusätzlich etablieren sich immer mehr Internetplattformen, die sowohl Privat-Fahrzeuge als auch Private-Mitfahrten auf einer bestimmten Strecke auf einem Marktplatz anbieten.⁹⁹ Wie weit diese Transformation von „Nutzen statt Besitzen“ gehen wird, ist derzeit noch nicht absehbar. Sicherlich wird es in der Zukunft aber größere Unterschiede zwischen Märkten und Regionen/Städten in der Pkw-Nutzung geben als heute. In gesättigten oder stark regulierten Gebieten könnte der eben beschriebene Trend sogar zu einem höheren Besetzungs- und Nutzungsgrad der Fahrzeuge führen und damit den Pkw-Bestand bei gleicher Beförderungsleistung verringern. Die Wirkung dieses Trends auf die Elektromobilität ist zwar nicht Gegenstand dieser Arbeit, es ist aber davon auszugehen, dass die langen Ladezeiten batterieelektrischer Fahrzeuge und die noch fehlende Infrastruktur für FCEV einer Pkw-Nutzung mit so wenig wie möglich Standzeiten entgegensteht. Diese ist wiederum notwendig, damit sich die Investition in die Fahrzeuge und Infrastruktur so schnell wie möglich amortisiert.

Die Strom- und Wasserstoffinfrastruktur könnte aber auch ein wichtiger Treiber der Zukunft darstellen. Wie in 2.1.2 Energieversorgung erwähnt ist damit zu rechnen, dass in einem auf erneuerbare Energien basierenden Energiesystem erhebliche Mengen an Überschussstrom

⁹⁴ Vgl. Propfe und Schmid (2011) und Sammer, Meth, et al. (2008).

⁹⁵ Siehe dazu Gliederungspunkt 2.1.5 Geschäftsmodelle und Mobilitätsoptionen.

⁹⁶ VDA (2013).

⁹⁷ Deutschland: 220.000; USA: 806.332 angemeldete Carsharing-Mitglieder im Jahr 2012. Im Jahr 2014 waren in Deutschland bereits 757.000 Teilnehmer registriert. Breiting (2014).

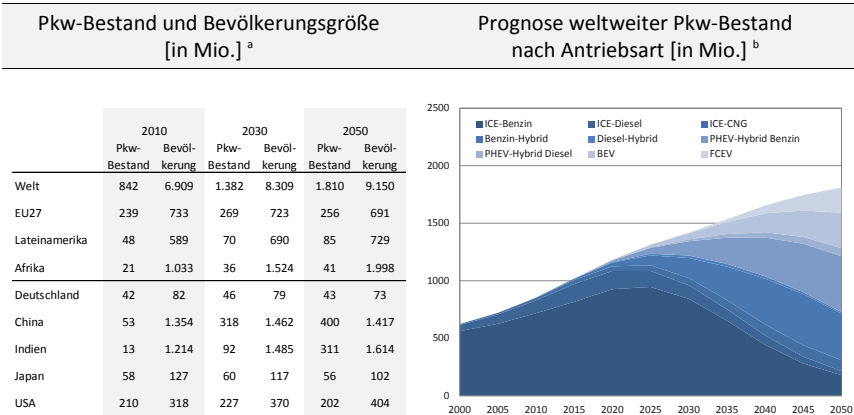
⁹⁸ Breiting (2014), Werte für das Jahr 2012.

⁹⁹ z. B. Mitfahrgelegenheit.de, autonetzer.de oder Nachbarschaftsauto.

anfallen. Für diese müssen neben dem Ausbau der Netze auch Stromspeicher geschaffen werden.¹⁰⁰ Die Traktionsbatterien der Elektrofahrzeuge könnten dabei die Rollen der Stromabnehmer und Stromspeicher einnehmen. Wasserstoff könnte in diesem System durch seine positiven Eigenschaften als LangzeitspeichermEDIUM erhebliche Mengen an Überschussstrom chemisch speichern und wiederum für die Mobilität von FCEV genutzt werden.¹⁰¹

2.2 Der deutsche Pkw-Markt ¹⁰²

Der deutsche Pkw-Markt erreichte mit 42 Mio. zugelassenen Pkw im Jahr 2010 nach den USA, Japan und China den viertgrößten Pkw-Landesbestand in der Welt. Am weltweiten Bestand von 842 Mio. Pkw im Jahr 2010 waren in der Bundesrepublik Deutschland jedoch nur fünf Prozent des Pkw-Weltbestandes zugelassen. Abbildung 7 (links) zeigt den prognostizierten Pkw-Bestand im Vergleich zur Prognose der weltweiten Bevölkerung bis zum Jahr 2050. Demnach wird der Pkw-Bestand in den nächsten Jahren vor allem in Indien und China wachsen, Europa und die USA bleiben auf nahezu konstantem Niveau. Abbildung 7 (rechts) zeigt eine IEA-Prognose des weltweiten Pkw-Bestandes nach der Antriebsart. Das hier dargestellte Szenario stellt den optimistischen Fall mit einem sehr hohen Flottendurchsatz von alternativen Antrieben dar. Nach der IEA-Prognose findet bis zum Jahr 2050 wohl eine Verdoppelung des weltweiten Pkw-Bestandes im Vergleich zu heute statt. Bei einer durchschnittlichen Pkw-Lebensdauer von 15 Jahren ist dadurch in der Zukunft mit einer erheblichen Produktionssteigerung von Pkw zu rechnen.



^a Pkw-Bestand aus IEA (2012), Basisdaten, Bevölkerungsprognose aus Eurostat (2010)
^b IEA (2012), S. 443 Improved Case bzw. 2 °C-Szenario: Im Jahr 2050 beträgt der weltweite Pkw-Bestand 1,8 Mrd. Pkw. Im weniger optimistischen 4°C-Szenario werden 2,3 Mrd. Pkw für 2050 prognostiziert.

Abbildung 7: Entwicklung Bevölkerungsgröße und Pkw-Bestand

¹⁰⁰ Vgl. Genose und Wietschel (2011).
¹⁰¹ Vgl. dazu Gliederungspunkt 4.2 Well-to-Tank-Kraftstoff-Herstellung (WtT).
¹⁰² Dieser Abschnitt basiert im Wesentlichen auf DLR und Wuppertal-Institut (2015), S. 301ff.

Im Jahr 2012 wurden weltweit 63 Mio. Pkw produziert. Davon wurden in Europa 23 Prozent, in der NAFTA¹⁰³ elf Prozent, in Japan und Südkorea 20 Prozent und in den BRIC-Staaten¹⁰⁴ bereits 37 Prozent produziert. In Deutschland wurden 2012 5,4 Mio. Pkw produziert, was knapp neun Prozent der weltweiten Produktion entspricht. Das Durchschnittsalter der in der EU zugelassenen Pkw lag im Jahr 2010 bei 8,3 Jahren. Irland hat dabei die jüngste Flotte mit einem Durchschnittsalter von 6,3 Jahren. Der deutsche Durchschnitt liegt bei 8,3 Jahren. Die ältesten Fahrzeuge befinden sich mit einem Durchschnittsalter von zwölf Jahren in Estland. Die europäische Flotte teilt sich dabei etwa zu jeweils 1/3 auf Fahrzeuge \leq fünf Jahre, fünf bis zehn Jahre und \geq zehn Jahre auf.¹⁰⁵

2.2.1 Flottenzusammensetzung und Neuwagenmarkt

Der Fahrzeugbestand ist in den letzten Jahren in Deutschland stetig gewachsen und hat bis zum 01.01.2015 eine Größe von 44,4 Mio. Pkw erreicht. Im Vergleich dazu waren im Jahr 2000 nur 39 Mio. Pkw in Deutschland zugelassen. Das entspricht einer Steigerung von 14 Prozent im Vergleich zur Jahrtausendwende.¹⁰⁶ Tabelle 5 gibt einen Überblick über den Pkw-Bestand am 01.01.2015 und die Anzahl der Neuzulassungen im Jahr 2014. Dabei ist auffällig, dass der Anteil von neu zugelassenen Diesel-Pkw mit 47,8 Prozent deutlich über dem Bestand von 31,2 Prozent liegt – ein Trend, der schon über mehrere Jahre anhält und langfristig auch den Flottenbestand signifikant verändern wird. Hingegen liegt der Anteil von neu zugelassenen Hybrid- und Elektro-Pkw nur bei 1,2 Prozent.

Tabelle 5: Pkw-Bestand und Neuzulassungen in Deutschland nach Kraftstoffart

	Pkw-Bestand 2015 ^a		Neuzulassungen 2014 ^b	
	Anzahl	Anteil [in %]	Anzahl	Anteil [in %]
Insgesamt	44.403.124	100	3.036.773	100
Benzin	29.837.614	67,2	1.533.726	50,5
Diesel	13.861.404	31,2	1.452.565	47,8
Flüssiggas (LPG)	494.148	1,1	6.234	0,2
Erdgas (CNG)	81.423	0,2	8.194	0,3
Hybrid (HEV, PHEV)	107.754	0,2	27.435	0,9
Elektro (REEV, BEV, FCEV)	18.948	0,0	8.522	0,3

^a Bestand am 01.01.2015 KBA (2015a); Hybrid = HEV und PHEV, Elektro = Fahrzeuge mit ausschließlich elektrischem Antrieb (BEV, REEV und FCEV) nach KBA (2015b)

^b KBA (2015c)

¹⁰³ NAFTA steht für North American Free Trade Agreement. Die NAFTA-Staaten sind USA, Kanada und Mexiko.

¹⁰⁴ BRIC steht für die Staaten Brasilien, Russland, Indien und China.

¹⁰⁵ ACEA (2013a). Nach den hier dargestellten Zulassungsdauern wird ein Großteil der europäischen Pkw in anderen Märkten weiter betrieben (z. B. Russland oder Afrika). Die Lebensdauer eines Pkw ist damit höher.

¹⁰⁶ Statistisches Bundesamt (2013).

Tabelle 6 zeigt die Verteilung des Pkw-Bestands nach dem Segment¹⁰⁷ in den Jahren 2008 und 2014. In diesem Zeitraum hat vor allem der Bestand an kleinen Fahrzeugen und Geländewagen zugenommen. Bei den kleinen Fahrzeugsegmenten Minis (zum Beispiel smart) und Kleinwagen (zum Beispiel VW Polo) ist der Bestand von 9,8 Mio. auf 11,7 Mio. Fahrzeuge um knapp 20 Prozent gestiegen. Ein Effekt, der sicherlich mit der in der Bundesrepublik in den Jahren 2009 und 2010 gezahlten Umweltprämie in Verbindung steht.¹⁰⁸ Das mittlere Fahrzeugsegment, bestehend aus den Kompaktwagen (zum Beispiel VW Golf) und der Mittelklasse (zum Beispiel Mercedes-Benz C-Klasse) macht 2014 43 Prozent des Pkw-Bestands aus. Damit hat sich dieses Segment im Vergleich zu den 49 Prozent aus dem Jahr 2008 um sechs Prozent verkleinert. Hingegen ist der Geländewagen und SUV-Bestand um 130 Prozent zwischen 2008 und 2014 auf 2,8 Mio. Pkw gestiegen. Hier ist von einer Abwanderungsbewegung von Mittelklasse-Kunden bzw. Obere-Mittelklasse-Kunden auszugehen.

Tabelle 6: Pkw-Bestand in Deutschland nach Segment im Jahr 2014 und 2008¹⁰⁹

	Pkw-Bestand 2014		Pkw-Bestand 2008	
	Anzahl [in Mio.]	Anteil [in %]	Anzahl [in Mio.]	Anteil [in %]
Insgesamt	43,8	100	41,2	100
Minis	2,8	6	1,6	4
Kleinwagen	8,8	20	8,2	20
Kompaktwagen	11,6	26	11,5	28
Mittelklasse	7,4	17	8,6	21
Obere Mittelklasse	2,2	5	2,5	6
Geländewagen + SUV	2,8	6	1,2	3
sonstige ^a	7,4	17	7,5	18

^a Oberklasse, Sportwagen, Mini-Vans, Großraum-Vans, Wohnmobile, Nutzfahrzeuge

Weit über die Hälfte der Pkw-Zulassungen (62 Prozent) im Jahr 2012 wurde nicht von privaten Käufern, sondern von Unternehmen, öffentlichen Einrichtungen und sogenannten freien Berufen als Firmenwagen durchgeführt. Somit wurden nur 38 Prozent der Fahrzeuge von Privatkäufern zugelassen.¹¹⁰ Die Privatkäufer halten aber wiederum knapp 90 Prozent der zugelassenen Fahrzeuge im gesamten Pkw-Bestand. Das erklärt sich durch die kürzere Halte-dauer der Firmenwagen, die nach ihrer Nutzung wieder dem Gebrauchtwagenmarkt und damit größtenteils den Privatkunden zur Verfügung stehen.¹¹¹ Der Gebrauchtwagenmarkt ist mit einer durchschnittlichen Größe von 6,5 Mio. Fahrzeugen etwa doppelt so groß wie der Neuwagenmarkt von 3,3 Mio. neu zugelassenen Pkw pro Jahr.¹¹² Die Addition von Neuzulas-

¹⁰⁷ Das KBA teilt die zugelassenen Personenwagen in 13 Fahrzeugsegmente. Die Segmentierung erfolgte in Absprache mit der deutschen Automobilindustrie anhand optischer, technischer und marktorientierter Merkmale. KBA (2013a), S. 39.

¹⁰⁸ BAFA (2009).

¹⁰⁹ Statistisches Bundesamt (2013) und KBA (2014).

¹¹⁰ KBA (2013b).

¹¹¹ Gnann, Plötz, et al. (2012), S.10.

¹¹² DAT (2013), S. 21. Mittelwert der Pkw-Neuzulassungen und Besitzumschreibungen von 2003 bis 2012.

sungen und Besitzumschreibungen gebrauchter Fahrzeuge der letzten zehn Jahre in Deutschland ergibt einen Durchschnitt von 9,8 Mio. Pkw-Zulassungen pro Jahr.

2.2.2 Fahrleistung

In Deutschland gibt es keine zentrale Stelle, die die reale Fahrleistung der einzelnen Pkw-Antriebe dokumentiert und für wissenschaftliche Untersuchungen nutzbar macht. Verkehrsmodelle und Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen von alternativen und konventionellen Antrieben unterliegen deshalb oft Annahmen über die tatsächliche Fahrleistung der zu untersuchenden Fahrzeuge. Denkbare Institutionen, um die reale Fahrleistung der Fahrzeuge zu erfassen, wären der TÜV oder die DEKRA, die bei ihren regelmäßigen Hauptuntersuchungen der Fahrzeuge¹¹³ auch den Kilometerstand dokumentieren müssen.¹¹⁴

Um dennoch gesicherte Daten für Verkehrspolitik und Verkehrsplanung zu erhalten, bedient man sich der Methode der Verkehrsbefragung. In Deutschland existieren derzeit mehrere größer angelegte Verkehrsbefragungen.¹¹⁵ Die wohl umfangreichste wurde von der Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt) letztmalig im Jahr 2002 durchgeführt. Dort wurde auf Basis unterschiedlicher Erhebungen (Halterbefragung nach dem Tachostand, Erhebung zum grenzüberschreitenden Verkehr) die Kfz-Fahrleistung empirisch ermittelt. Die Erhebung stützt sich auf eine Befragung von 127.000 Fahrzeughaltern mit einer Rücklaufquote von etwa 70 Prozent.¹¹⁶ Da die Fahrleistungserhebung schon älter als zehn Jahre ist, werden hier im Weiteren auch neuere Erhebungen betrachtet und mit den Ergebnissen der BASt verglichen.

Nobis und Luley geben in ihrer Veröffentlichung „Bedeutung und gegenwärtiger Stand von Verkehrsdaten in Deutschland“ einen ausführlichen Überblick über die verschiedenen Verkehrserhebungen.¹¹⁷ Tabelle 7 gibt einen Überblick über Art und Umfang der für diese Arbeit näher untersuchten Verkehrsbefragungen. Beim Mobilitätspanel (MOP) werden Personen in Haushalten über insgesamt drei Jahre einmal im Jahr über ihr Mobilitätsverhalten befragt. Die befragten Personen müssen dabei Auskunft über die Fahrleistung und den Benzinverbrauch der im Haushalt vorhandenen Pkw geben. Eine weitere Spezifikation der Pkw nach Typ oder Segment findet in der Erhebung nicht statt. Die Studie Mobilität in Deutschland (MiD) wurde bisher in den Jahren 2002 und 2008 durchgeführt. Sie basiert auf einer komplexen Kombination aus schriftlicher, telefonischer und Online-Erhebung. Im Ergebnis werden die Weghäufigkeit und die Verteilung der Verkehrsmittelnutzung der befragten Personen ausgegeben. Dabei können die berichteten Wege und deren Weglängen direkt einem Pkw zugeordnet werden. In der Studie Kraftfahrzeugverkehr in Deutschland (KiD) werden eine statistisch relevante Menge an Fahrzeugen und Haltern zufällig aus dem zentralen Fahrzeug-

¹¹³ Bei Pkw: erstes Untersuchungsintervall 36 Monate nach der Erstzulassung. Alle weiteren Untersuchungen alle 24 Monate. Weiterhin müssen Taxis und Mietwagen, Motorräder und Leichtkrafträder, Lkw und Omnibusse im Abstand von zwölf bis 24 Monaten untersucht werden.

¹¹⁴ BGBl (2012).

¹¹⁵ MiD – Mobilität in Deutschland, MOP – Deutsches Mobilitätspanel, SrV – System repräsentativer Verkehrsbefragungen, KiD – Kraftfahrzeugverkehr in Deutschland, Fahrleistungserhebung der BASt.

¹¹⁶ BASt (2002). Die BASt führt im Zeitraum von September 2013 bis Ende 2015 ein Forschungsprojekt zur Ermittlung der Fahrleistung von in Deutschland zugelassenen Kfz (Inländerfahrleistung) mit dem Titel „Fahrleistungserhebung 2014“ durch. Ergebnisse dazu liegen für diese Arbeit noch nicht vor.

¹¹⁷ Nobis und Luley (2005).

register des KBA gezogen und der Fahrer gebeten, an einem Tag ein Wegtagebuch zu führen. Die Wegtagebücher verteilen sich über alle Wochentage. Die Ergebnisse der letzten Erhebung wurden erst im Frühjahr 2012 vorgestellt. Fahrleistungsdaten verschiedener Antriebsarten sind in der öffentlichen Version nicht gedruckt. Die Fraunhofer ISI REM2030 Daten beziehen sich ausschließlich auf den Wirtschaftsverkehr. In der weiteren Analyse wird daher nur auf die Daten der Erhebung Mobilität in Deutschland (MiD 2008) und der Fahrleistungserhebung (BAST 2002) zurückgegriffen.

Tabelle 7: Verschiedene Verkehrserhebungen im Vergleich

	Mobilitätspanel (MOP) ^a	Mobilität in Deutschland (MiD) ^b	Kraftfahrzeug- verkehr in Deutschland (KiD) ^c	Fraunhofer ISI (REM2030) ^d
Durchführung	1994-2011	2002, 2008	2002, 2010	2012
Erhebungszeitraum	3 x in 3 Jahren	1 Jahr	1 Jahr	1 Jahr
Auftraggeber	BMVBS	BMVBS	BMVBS	-
Auftragnehmer	KIT	Infas, DLR	WVI, IVT, DLR, KBA	Fraunhofer ISI
Umfang	1.000 HH	50.000 HH	100.000 Fzge.	354 Fzge.
Berichtsperiode	7 Tage	1 Tag	1 Tag	3 Wochen
^a KIT (2012)		^c KiD (2012)		
^b infas und DLR (2008)		^d Fraunhofer ISI REM (2030)		

Die Datensätze der MiD lassen sich auch nach Fahrzeugsegmenten auswerten, da die Fahrzeuge in der Erhebung eindeutig den Fahrzeugsegmenten des KBA zugeordnet werden können (Tabelle 8). In der Analyse fällt auf, dass Fahrzeuge mit einem Diesel- und Gasmotor (CNG/LPG) signifikant mehr fahren als Benzinfahrzeuge. Diese Erkenntnis deckt sich auch mit den Ergebnissen der Fahrleistungserhebung der BAST aus dem Jahr 2002. Dort liegt die durchschnittliche Fahrleistung von Benzin-Pkw bei 11.934 km/a und von Diesel-Pkw bei 20.925 km/a¹¹⁸ im Vergleich zu den 11.793 bzw. 21.104 km/a aus der MiD 2008 (Tabelle 8). Im Vergleich zu den eben genannten Zahlen geht das DIW in seiner alljährlich erscheinenden Veröffentlichung „Verkehr in Zahlen“ für das BMVBS von einer durchschnittlichen Laufleistung von 11.900 km/a für Benzinfahrzeuge und 21.100 km/a für Dieselfahrzeuge aus dem Jahr 2008 aus.¹¹⁹ Die aus der MiD 2008 errechneten Zahlen scheinen somit plausibel und werden im Weiteren verwendet. Für alternative Antriebe lagen die Fallzahlen in der MiD 2008 bei nur 30 Fahrzeugen, welche hier aufgrund der geringen Stichprobengröße nicht dargestellt werden.¹²⁰ In dieser Arbeit werden im weiteren Annahmen zur Laufleistung von alternativen Antriebe getroffen, da weder in der MiD 2008 noch in den anderen hier untersuchten Studien belastbare Zahlen zu ihrer Fahrleistung vorliegen. Erhebungen und Datensammlungen zur Fahrleistung von alternativen Antrieben aus Flottenversuchen werden in der vorliegenden Arbeit nicht ausgewertet.¹²¹ Für zukünftige Untersuchungen sind sie aber wünschenswert.

¹¹⁸ IVT (2004).

¹¹⁹ BMVBS (2013), S. 303.

¹²⁰ Redelbach (2012); Stichprobengröße der Untersuchung 29.166; Die Gesamtlauflistung wurde mit den aus der MiD hinterlegten Gewichtungsfaktoren für die Fahrzeug-Segmente berechnet.

¹²¹ Denkbar sind hier die Fraunhofer ISI REM 2030-Daten.

Tabelle 8: Vergleich Pkw-Fahrleistung [in km pro Pkw und Jahr] nach Fahrzeugsegment und Kraftstoffart von MiD 2008 und Fahrleistungserhebung BAST 2002

	MiD 2008 ^a			BAST 2002 ^b	
	Benzin	Diesel	CNG/LPG	Gesamt	Gesamt
Minis	10.428	19.257	19.800	10.985	11.325
Kleinwagen	10.904	19.135	15.789	11.534	11.238
Kompaktklasse	11.964	20.843	23.530	13.720	13.298
Mittelklasse	12.847	23.591	23.746	16.065	15.468
Obere Mittelklasse	12.551	24.251	20.538	17.422	16.730
Oberklasse	14.785	22.114	15.000	16.407	18.664
Geländewagen	11.721	19.813	16.700	16.171	16.010
Sportwagen	9.774	13.036	15.000	9.880	-
Mini-Vans	11.847	19.321	21.380	13.853	-
Großraum-Vans	13.588	20.401	20.839	17.075	-
Utilities	12.060	18.445	18.190	16.690	18.320
Wohnmobile	15.000	11.452	-	11.461	-
nicht zuzuordnen	11.193	19.784	16.533	13.323	-
Gesamtergebnis	11.793	21.104	20.452	14.111	13.397

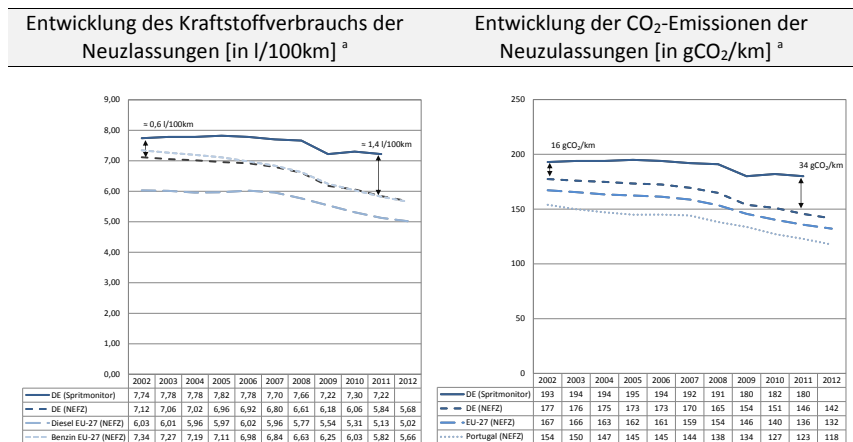
^a Redelbach (2012) aus MiD (2008)^b BAST (2002) aus IVT (2004) Tabelle 9, S. 187

2.2.3 Kraftstoffverbrauch

Der Kraftstoffverbrauch eines Pkw hängt neben seinem Gewicht, der Beladung des Fahrzeugs, dem Streckenprofil und der individuellen Fahrweise des Fahrers auch von den innermotorischen Verlusten, den Nebenverbrauchern (über Riementrieb: Klimaanlage, Wasserpumpe, Lichtmaschine) und der Bauform (Rollwiderstand, Luftwiderstand) des Fahrzeugs ab. Um vergleichbare Daten für die Kunden, die CO₂-Regulierung und die CO₂-basierten Fahrzeugsteuer zu erhalten, erfolgt die Ermittlung des Kraftstoffverbrauchs in der EU seit dem 01.01.1996 im „Neuen Europäischen Fahrzyklus“ (NEFZ).¹²² Dabei wird auf einem Rollenprüfstand ein definierter Fahrzyklus abgefahren, bei ansonsten konstant gehaltenen Rahmenbedingungen zu Umgebungstemperatur, Zuladung, Schaltpunkten, Beginn der Messung und ausgeschalteter Nebenverbraucher (zum Beispiel Klimaanlage).

Abbildung 8 zeigt auf der linken Seite die Entwicklung des Kraftstoffverbrauchs und auf der rechten Seite die Entwicklung der dazugehörigen CO₂-Emissionen. Kraftstoffverbrauch und CO₂-Emissionen lassen sich unter einem konstant angenommenen Kohlenstoffgehalt der jeweiligen Kraftstoffe generell auch in einem Diagramm darstellen.¹²³ Hier werden sie aber aus Gründen der Übersichtlichkeit getrennt aufgeführt. Die oberen Kurven zeigen jeweils den gemittelten Kraftstoffverbrauch von Benzin und Diesel für Deutschland (DE) von 2002 bis 2012.

¹²² EG (2013).¹²³ 1 l Benzin ≈ 2,36 kg CO₂, 1 l Diesel ≈ 2,62 kg CO₂ siehe dazu JEC (2013), S. 12.



^a Kraftstoffverbrauch bzw. CO₂-Emissionen: Im NEFZ aus EEA (2013); Spritmonitor aus Mock et al. (2013)

Abbildung 8: Entwicklung des durchschnittlichen Kraftstoffverbrauchs und der CO₂-Emissionen in Deutschland und Europa

Die Kurve DE (Spritmonitor)¹²⁴ zeigt den gemittelten Realverbrauch für Deutschland an, der sich immer weiter von den NEFZ-Werten entfernt hat. Außerdem sind der Verbrauchsunterschied zwischen Benzin und Diesel-Kraftstoff zu sehen sowie die CO₂-Emissionen der portugiesischen Flotte, welche die niedrigsten in der EU darstellen.

2.3 Alternative und konventionelle Antriebstechnologien¹²⁵

Elektrisch angetriebenen Pkw wurde in den vergangenen Jahrzehnten mehrfach der Durchbruch prophezeit¹²⁶, dennoch war der Hubkolben-Verbrennungsmotor¹²⁷ mit einem Drehzahl-/Drehmomentwandler (Getriebe) und einer Anfahr-/Schaltkupplung das Antriebskonzept, was sich weltweit als Pkw-Antrieb durchgesetzt hat. Die Gründe sind die hohe Energiedichte von Benzin und Diesel, das gute Verhältnis zwischen Bauraum und Gewicht von Antriebsstrang¹²⁸ und mitgeführtem Kraftstoff und nicht zuletzt die hohe Robustheit des Verbrennungsmotors gegenüber Wärme, Kälte und Erschütterungen. Neben diesen technischen Eigenschaften können Fahrzeuge mit einem Verbrennungsmotor auch zu ökonomisch vertretbaren Kosten gebaut und betrieben werden.¹²⁹ Nachteile dieses Antriebssystems sind die Emissionen von Treibhausgasen, Schadstoffen und Lärm, die bei der Verbrennung von Benzin, Diesel und Erdgas auftreten, sowie die Endlichkeit dieser Ressourcen. Nachfolgend

¹²⁴ Ausgewertet wurden von Mock, German, et al. (2013), S. 3, S. 12. die Internetdatenbank Spritmonitor.de. Von 2001 bis 2011 durchschnittlich 5.000 Einträge/a von vornehmlich Privatkunden. Diese wurden dann zu gleichen Teilen auf Benzin- und Diesel-Fahrzeuge verteilt.

¹²⁵ Dieser Abschnitt basiert im Wesentlichen auf Kreyenberg, Lischke, et al. (2015), S. 89ff.

¹²⁶ Hoffman (1969); Biedermann, Birnbaum, et al. (2002).

¹²⁷ Welcher nach dem Prinzip des Otto- oder Dieselmotors arbeitet.

¹²⁸ Zum Antriebsstrang zählen Motor, Getriebe und die Antriebsachsen.

¹²⁹ Vgl. Braess und Seiffert (2011), S. 158.

werden die für die vorliegende Arbeit untersuchten Fahrzeugantriebe vorgestellt und deren Schlüsselkomponenten kritisch diskutiert (Abbildung 9).

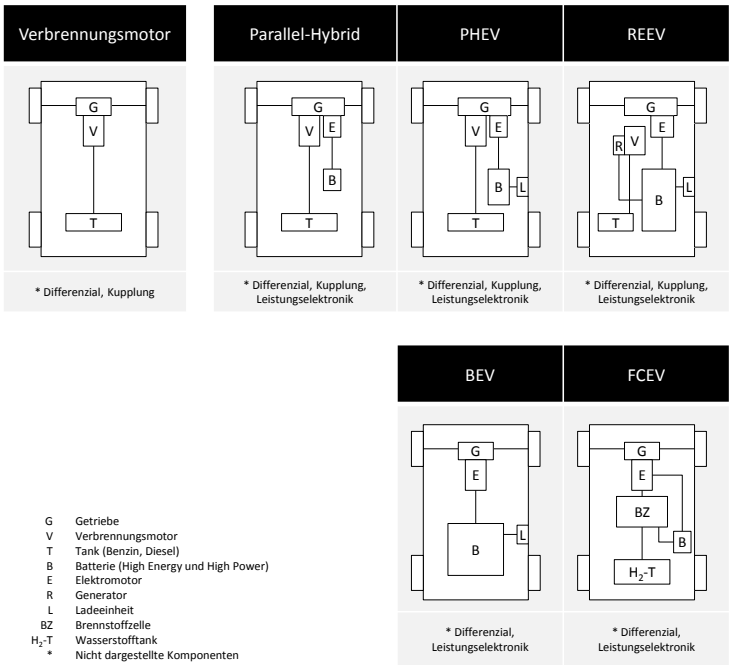


Abbildung 9: Systemaufbau von alternativen und konventionellen Antriebstechnologien

Da sich die in Abbildung 9 gezeigten Fahrzeugantriebe noch nicht in größerer Stückzahl von verschiedenen Herstellern auf dem Markt befinden, besteht eine große Unsicherheit über die Leistungsfähigkeit und den Verbrauch dieser Fahrzeugantriebe. Wissenschaftliche Untersuchungen mit ökonomischem und ökologischem Fokus mussten sich in der Vergangenheit deshalb diese komplexen Fahrzeugantriebe aus einer Vielzahl von Annahmen und Studien zusammenstellen.¹³⁰

Vor einem ähnlichen Problem stand die Wissenschaft und Industrie Mitte der Nullerjahre, als diverse Biokraftstoffe für Verbrennungsmotoren und das Brennstoffzellenfahrzeug, betrieben mit Wasserstoff aus verschiedenen Primärenergiequellen, im Fokus der öffentlichen Diskussionen standen. Daraufhin wurden in Europa umfangreiche Untersuchungen von einem Konsortium aus EUCAR¹³¹, CONCAWE¹³² und dem JRC¹³³ der Europäischen Kommissi-

¹³⁰ Siehe dazu z. B. TNO, AEA, et al. (2011), S. 60.; Kley (2011), S. 61; Mock (2010), S. 95.

¹³¹ European Council for Automotive R&D.

¹³² Conservation of Clean Air and Water in Europe.

¹³³ Joint Research Centre.

on durchgeführt, die es ermöglichen, die verschiedenen alternativen und konventionellen Antriebe im Hinblick auf Energieverbrauch und Treibhausgasemissionen in sogenannten Well-to-Wheel-Analysen¹³⁴ zu untersuchen.¹³⁵

Das im Juli 2013 erschienene Update der Tank-to-Wheel-Studie zur Version 4 mit den zu den vorherigen Versionen noch fehlenden alternativen Fahrzeugantrieben (BEV, PHEV und REEV) für die Jahre 2010 und 2020 ist die Grundlage der hier durchgeführten Analysen.¹³⁶ Die EUCAR Tank-to-Wheel-Studie V4 wurde von Experten der europäischen Automobilindustrie¹³⁷ in einem Projekt unter Leitung der Firma AVL durchgeführt. Ziel der Untersuchungen des Konsortiums war es, wie schon in den vorherigen Versionen, die verschiedenen Antriebe von ihrer Performance möglichst vergleichbar auszulegen. Das dort modellierte Referenzfahrzeug entspricht der Größe eines VW Golf. Vor der Verbrauchssimulation wurden von den europäischen OEM¹³⁸ und AVL-Performance-Kriterien definiert, die das Referenzfahrzeug mit dem jeweiligen Antrieb auf jeden Fall erreichen muss. So müssen alle EUCAR-V4-Fahrzeuge mindestens in der Lage sein, von 0-100 km/h in elf Sekunden zu beschleunigen, eine Höchstgeschwindigkeit von 180 km/h und eine Reichweite von 500 km erreichen. Eine Ausnahme bildet das Batteriefahrzeug, welches aufgrund der schweren Batterie nur eine Höchstgeschwindigkeit von 130 km/h und eine Reichweite von 120 km für das Jahr 2010 bzw. 120 km/h und 200 km für das Jahr 2020 erreichen muss. Der Antriebsstrang und die Energiespeicher (Kraftstofftank und Batterie) aller Fahrzeuge wurden so ausgelegt, dass diese Performance-Kriterien erfüllt werden können.

Die Verbrauchssimulation aller untersuchten EUCAR-V4-Fahrzeugantriebe wurde im Neuen Europäischen Fahrzyklus (NEFZ) durchgeführt, welcher auch für die Zertifizierung des Fahrzeugs und damit der europäischen Abgasnormung zugrunde liegt.¹³⁹ Die Studie simuliert dabei nur Fahrzeugantriebe der Jahre 2010 und 2020+. Ein weiterer Ausblick auf das Jahr 2030 ist laut den beteiligten Experten mit zu großen Unsicherheiten behaftet. Für das Jahr 2030 wurde deshalb im Folgenden keine Veränderung der technischen Parameter vorgenommen, um die darauf aufbauenden Kostenberechnungen in Kapitel 3 und 6 nicht mit diesen Unsicherheiten zu beaufschlagen. Es wird jedoch unterstellt, dass bis zum Jahr 2030 eine Verbrauchsverbesserung von zehn Prozent bei allen Fahrzeugantrieben stattfindet. Das entspricht einer Verbesserung von einem Prozent pro Jahr und kann zum Beispiel durch Leichtbau erreicht werden.

¹³⁴ Siehe dazu auch Kapitel 4 Energiesystemanalysen von alternativen Antrieben.

¹³⁵ EUCAR/CONCAWE/JRC (2011) WtT and TtW Reports.

¹³⁶ JEC (2013), im Folgenden EUCAR V4 genannt.

Die Fahrzeuge von 2010 entsprechen der Technologie von Fahrzeugen der Jahre 2008 bis 2012, im Folgenden 2010 genannt. Die Fahrzeuge des Jahres 2020 entsprechen der Technologie von 2020+, im Folgenden 2020 genannt.

¹³⁷ Daimler, BMW, VW, Porsche, Opel, Ford, PSA, Renault, Fiat, Volvo und Scania.

¹³⁸ Original Equipment Manufacturer: Hier sind die Automobilhersteller gemeint.

¹³⁹ Eine ausführliche Diskussion über den NEFZ findet sich im Gliederungspunkt 4.3 Tank-to-Wheel-Energieverbrauch von alternativen Antrieben.

2.3.1 Schlüsseltechnologien

Verbrennungsmotoren

In den letzten Jahren wurde von der Automobilindustrie eine Reihe von Verbesserungsmaßnahmen an Verbrennungsmotoren umgesetzt, die signifikante Reduktionen des Kraftstoffverbrauchs und der Schadstoffemissionen zur Folge hatten. Dazu zählen zum Beispiel die Reduzierung von Reibungsverlusten und Motorgewicht, die Abgasrückführung und die Anpassung der Kraftstoff-Luftverhältnisse bei Lastwechselvorgängen oder die verbesserte Katalysatoren-Technik. Weiterhin wurde unter dem Begriff „Downsizing“ die hubraumbezogene Leistung durch folgende Maßnahmen erhöht: Aufladung, variable Ventilsteuerung, Kraftstoff-Direkteinspritzung, kontrollierte Selbstzündung und die Erhöhung des Verdichtungsverhältnisses. So konnte der Gesamtwirkungsgrad¹⁴⁰ des Motors durch die Umsetzung der genannten Maßnahmen auf 0,36 bei Pkw-Ottomotoren und bis zu 0,43 bei Dieselmotoren gesteigert werden.¹⁴¹ Cornal Stan gibt in seinem Buch „Alternative Antriebe für Automobile“ einen umfassenden Überblick über diese Verbesserungsmaßnahmen.¹⁴²

Batterien

Um ein Fahrzeug anzutreiben, muss die dafür notwendige Energie entweder kontinuierlich zugeführt¹⁴³ oder in einem Speicher¹⁴⁴ mitgeführt werden. Wenn der Speicher über einen elektrisch-chemischen Wandler wieder aufgeladen werden kann, spricht man von einem Akkumulator. Der Begriff Batterie bezeichnete ursprünglich die Zusammenschaltung mehrerer Zellen¹⁴⁵, und als Akkumulator wurden mehrere wiederaufladbare zusammengeschaltete Zellen bezeichnet.¹⁴⁶ Im heutigen Sprachgebrauch wird für Akkumulator häufig der Oberbegriff Batterie gewählt. Darum werden im Folgenden auch hier Akkumulatoren als Batterien bezeichnet. Diese Batterien sind elektrochemische Energiespeicher, bei denen die Energie durch chemische Stoffumwandlung gespeichert (Laden der Batterie) und durch die Umkehrung der Reaktion (Entladen der Batterie) wieder freigesetzt werden kann.¹⁴⁷

Traktionsbatterien für Fahrzeuge bestehen aus Zellen, dem Batteriemanagement, einschließlich Zellmonitoring, der Elektrik/Elektronik, der Sensorik, den Sicherheitselementen, der Kühlperipherie und dem Gehäuse. Wobei 60 bis 80 Prozent der Wertschöpfung auf die Zellen entfallen.¹⁴⁸ Für den Einsatz von Batterien als Traktionsbatterie im Fahrzeug lassen sich die Anforderungen an die Batterien in fünf Kategorien einteilen: (I) Sicherheit (II) Zyklen- und Alterungsbeständigkeit (III) Kosten (IV) Energiedichte und (V) Leistungsdichte.¹⁴⁹ Die derzeit diskutierten Traktionsbatterien für alternative Antriebe unterscheiden sich zum Teil erheb-

¹⁴⁰ Auch effektiver Wirkungsgrad: Ist das Produkt aus thermischem Wirkungsgrad (idealer Vergleichsprozess), Gütegrad (Unterschied zwischen dem idealen und realen Kreisprozess) und mechanischem Wirkungsgrad (Verluste aus Reibung in Zylinderkopf und Triebwerk sowie Antriebsleistung der Nebenaggregate).

¹⁴¹ Vgl. Braess und Seiffert (2011), S. 162.

¹⁴² Vgl. Stan (2008), S. 53ff.

¹⁴³ Z. B. in Form einer elektrischen Netzanbindung wie bei Straßenbahnen und Zügen.

¹⁴⁴ Als Speicher für elektrische Energie in Pkw kommen Batterien, Hochenergiekondensatoren und Schwungräder infrage. In dieser Arbeit werden nur Batterien weiter untersucht.

¹⁴⁵ Eine Zelle ist ein galvanisches Element, was aus Elektrodenpaar, Elektrolyt, Separator und Gehäuse besteht.

¹⁴⁶ Vgl. Jossen und Weydanz (2006), S. 5f.

¹⁴⁷ Vgl. Böcker (2011), S. 49.

¹⁴⁸ Vgl. NPE (2010), S. 2.

¹⁴⁹ Vgl. Wallentowitz, Freialdenhoven, et al. (2010), S. 85.

lich in der Ausprägung der Eigenschaften in den Kategorien. Nicht jede Batterie ist auch für jeden Einsatzzweck geeignet. Das Fraunhofer ISI gibt in den Veröffentlichungen „Technologie-Roadmap-Energiespeicher für die Elektromobilität“¹⁵⁰ und „Energiespeicher-Monitoring für die Elektromobilität (EMOTOR)“¹⁵¹ einen ausführlichen Überblick über das Potenzial der einzelnen Batterietechnologien. In dieser Arbeit werden im Folgenden die Besonderheiten von sogenannten Hochleistungs- und Hochenergiebatterien herausgearbeitet, da diese die Grundlage der im weiteren dazu durchgeführten Analysen bilden.

Hochleistungs-Batterien (HP)¹⁵² werden in HEV und FCEV eingesetzt. Die Anforderungen an den Energieinhalt der Batterie sind dort gering. An das Batteriesystem werden jedoch hohe Leistungsanforderungen beim Anfahren und Beschleunigen sowie beim Bremsen gestellt. Der Betriebspunkt einer HP-Batterie muss deshalb so gewählt werden, dass ausreichend Entladeleistung beim Beschleunigen zur Verfügung steht. Außerdem muss die beim Bremsen vom Generator erzeugte Energie innerhalb weniger Sekunden gespeichert werden. In der Regel liegt dieser Betriebspunkt bei einem Ladezustand¹⁵³ von 50 bis 60 Prozent. Somit bleibt ein Großteil der in einer HP-Batterie gespeicherten Energiemenge ungenutzt. Sie ist aber notwendig, um eine Tiefenentladung der Zellen zu vermeiden und somit eine entsprechende Zyklenbeständigkeit der Zellen und die damit verbundene hohe Lebensdauer der Batterie zu erreichen.¹⁵⁴

Hochenergie-Batterien (HE)¹⁵⁵ werden in REEV und BEV eingesetzt. Die Auslegung und das Nutzungsprofil von HE-Batterien unterscheidet sich deutlich von HP-Batterien. Um eine möglichst hohe Reichweite zu erzielen, wird hier ein wesentlich größerer Teil der Batterie-Gesamtkapazität auch tatsächlich genutzt. Durch die zunehmende Tiefe der Entladung sinkt jedoch die Zyklenbeständigkeit, aufgrund dadurch verstärkt auftretender Degradationseffekte¹⁵⁶ in den Zellen. Weitere wichtige Kenngrößen sind die Energie- und Leistungsdichte des Batteriesystems, die maßgeblich das Gewicht bzw. das Bauvolumen beeinflussen. Außerdem müssen für ein schnelles Wiederaufladen entsprechend hohe Ladeleistungen vorgesehen werden.¹⁵⁷ Batterien in PHEV stellen von ihrem Nutzungsprofil und der Auslegung einen Kompromiss beider Batteriesysteme (HP- und HE-Batterien) dar. Sie werden in dieser Arbeit im Weiteren vereinfachend als HE-Batterien betrachtet.

Lithium-Ionen-Batteriesystemen wird aufgrund ihrer hohen Energiedichte und der Vielfalt der möglichen Aktivmaterialien das größte Potenzial für HP- und HE-Batteriesysteme zugeschrieben. Die Herausforderungen der Zukunft liegen neben den Kosten in der Serienreife neuer Aktivmaterialien, die die Energiedichte, die Sicherheit, das Hochstromverhalten und die Lebensdauer dieser Systeme noch weiter steigern können.¹⁵⁸

¹⁵⁰ Fraunhofer-ISI (2012).

¹⁵¹ Sauer und Thielmann (2013).

¹⁵² Englisch: High Power (HP) Batteries werden im Folgenden als HP-Batterien bezeichnet.

¹⁵³ Englisch: State of Charge (SOC).

¹⁵⁴ Vgl. Ketterer, Karl, et al. (2009), S. 43f.

¹⁵⁵ Englisch: High Energy (HE) Batteries werden im Folgenden als HE-Batterien bezeichnet.

¹⁵⁶ Als Degradation wird die Verschlechterung der Materialeigenschaften, ausgelöst durch physikalische Effekte (z. B. Rekristallisation), mechanische Belastung (z. B. Schwingungen) und chemische Prozesse (z. B. Korrosion) bezeichnet. Wenzl (2007).

¹⁵⁷ Vgl. Ketterer, Karl, et al. (2009), S. 44f.

¹⁵⁸ Vgl. Jossen und Weydanz (2006), S. 151.

Elektromotoren

Elektrische Maschinen stellen in ihrer Ausführung als Generator für Wärme-, Wasser- und Windkraftanlagen die Grundlage der Stromerzeugung auf der ganzen Welt dar.¹⁵⁹ Als Elektromotoren sind sie ein entscheidendes Betriebsmittel in Industrie und Gewerbe sowie Bestandteil vieler Konsumgüter.¹⁶⁰ Im Automobilbau fanden sie in der Vergangenheit vor allem als Scheibenwischermotor, Sitzversteller und als Schiebe- bzw. Cabriodachöffner Anwendung. In der Lichtmaschine werden elektrische Maschinen im Generatorbetrieb zur Stromversorgung im Pkw genutzt. In alternativen Antrieben sollen Elektromotoren nun Anwendung als Traktionsmotor für Pkw finden.

Elektromotoren sind sehr leise und emittieren keine Schadstoffe. Im Vergleich zu Verbrennungsmotoren sind sie in weiten Drehzahlintervallen mit hohen Wirkungsgraden einsetzbar. Außerdem können sie im Generatorbetrieb beim Bremsen kinetische Energie in elektrische Energie umwandeln.¹⁶¹ Sie bestehen aus einem feststehenden Teil (dem Stator oder Ständer) und einem rotierenden Teil (dem Rotor, Läufer oder Anker). Über den Stator wird die elektrische Leistung zu- oder abgeführt und über den Rotor wird die mechanische Leistung ab- oder zugeführt. Die Energiewandlung findet dabei im Luftspalt zwischen Stator und Rotor statt. Eine Gliederung der verschiedenen Elektromotoren kann einerseits nach der verwendeten Stromart in Gleichstrom-, Wechselstrom- oder Drehstrommaschinen erfolgen, andererseits ist eine Einteilung nach der Wirkungsweise in Asynchron- oder Synchronmaschinen üblich.¹⁶² Innerhalb dieser Bautypen gibt es eine ganze Reihe von Untertypen auf die hier nicht näher eingegangen wird.

Von den genannten Bauformen ist die Permanentenerregte Synchronmaschine (PSM) die derzeit am häufigsten eingesetzte Bauform für Hybrid- und reine Elektrofahrzeuge. Ihre Vorteile liegen in den sehr hohen Wirkungsgraden im Teillastbereich, einem einfachen mechanischen und elektrischen Aufbau bei kleinen Bauvolumina und ihrer guten Regel- und Steuerbarkeit.¹⁶³

Nachteilig ist die Verwendung von seltenen Erden¹⁶⁴ in den Permanentmagneten der PSM. Diese Materialien machen die Magneten hitzebeständiger und stabiler gegen Entmagnetisierung durch mechanische Stöße oder andere Magnetfelder. Vor allem verstärken sie aber das Magnetfeld der eingesetzten Dauermagnete, was sich wiederum positiv auf den Wirkungsgrad der PSM auswirkt.¹⁶⁵ Durch die begrenzte Verfügbarkeit der seltenen Erden befinden sich fremderregte Synchronmaschinen, Asynchronmaschinen und Transversalflussmaschinen

¹⁵⁹ Die einzige Ausnahme ist die Photovoltaik, wo der Strom durch den photoelektrischen Effekt in Solarzellen hergestellt wird.

¹⁶⁰ Vgl. Fischer (2004); S. 11.

¹⁶¹ Vgl. Gerl (2002), S. 73.

¹⁶² Vgl. Fischer (2004), S. 15.

¹⁶³ Vgl. Hofmann (2010), S. 122ff.

¹⁶⁴ Unter dem Begriff „seltene Erden“ sind seltene Erdmetalle gemeint. Also chemische Elemente aus dem Periodensystem. Sie werden für die Herstellung von Konsumgütern (z. B. Computern, Handys und Digitalkameras) sowie in Elektromotoren eingesetzt. Zu ihnen gehören Elemente wie Neodym, Dysprosium oder Yttrium. Öko-Institut (2011).

¹⁶⁵ Vgl. Berkel (2013), S. 10f.

verstärkt in der Entwicklung für Hybrid- und reine Elektrofahrzeuge.¹⁶⁶ In dieser Arbeit finden sie jedoch noch keine Berücksichtigung.

Leistungselektronik

Die Leistungselektronik¹⁶⁷ wird dazu benötigt, den aus der Batterie kommenden Gleichstrom für die Bedürfnisse im Fahrzeug anzupassen. Dafür muss sie den im Elektromotor benötigten und durch Rekuperation erzeugten Wechselstrom aus bzw. in Gleichstrom umrichten. Das geschieht durch schnell schaltende Leistungshalbleiter, welche die Aufgabe haben, den Strom entweder zu leiten oder zu sperren. Weiterhin wird die Leistungselektronik dazu benötigt, den Hochvoltstrom der Batterie in die 12V-Spannung des Bordnetzes über Gleichstromwandler (DC/DC Wandler) umzuwandeln.¹⁶⁸ Im Vergleich zu der bei Verbrennungsmotoren eingesetzten Lichtmaschine zur 12V-Stromerzeugung hat der DC/DC Wandler eine höhere Effizienz sowie ein geringeres Gewicht und benötigt weniger Wartungsaufwand. Zukünftig soll die Leistungselektronik vor allem kompakter, leichter, leistungsfähiger und günstiger werden.¹⁶⁹ Von zentraler Bedeutung dafür ist die Entwicklung neuer Leistungshalbleiter, deren Packaging und Kühlung.¹⁷⁰ Auf die verschiedenen Arten heutiger und zukünftig möglicher Leistungshalbleiter wird hier nicht näher eingegangen.

Brennstoffzellen-Stack

Im Gegensatz zu Batterien wird bei Brennstoffzellen das Reduktionsmittel (der Brennstoff) und das Oxidationsmittel ständig zugeführt. Dadurch liefert die Brennstoffzelle im Prinzip unbegrenzt Energie, solange Reduktions- und Oxidationsmittel vorhanden sind. Als Brennstoffe gängiger Brennstoffzellentypen für Pkw-Anwendungen kommen vor allem Wasserstoff, aber auch Erdgas oder Methanol infrage.¹⁷¹

Die elektrische Energie wird in einer Brennstoffzelle durch Oxidation des chemischen Energieträgers Wasserstoff direkt¹⁷² erzeugt. Der Wasserstoff und der Luftsauerstoff werden dabei durch jeweils eine poröse und eine mit einem Katalysator beschichtete Elektrode geleitet. Zwischen den beiden Elektroden befindet sich ein Elektrolyt, der aus verschiedenen Materialien bestehen kann. Im Betrieb der Brennstoffzelle reagiert der Luftsauerstoff mit den Wasserstoffprotonen zu Wasser und bildet dabei ein positives Potenzial. So entsteht eine Potenzialdifferenz (elektrische Spannung) zwischen den beiden Elektroden. Der Elektrolyt dient dabei als Isolator, der verhindert, dass die beiden Gase in direkten Kontakt kommen und stattdessen ihre Elektroden über den äußeren Stromkreis austauschen. Die verschiedenen Brennstoffzellentypen können nach der Art ihres Elektrolyts (zum Beispiel Polymer-Elektrolyt-Brennstoffzelle – PEMFC; Oxidkeramische-Brennstoffzelle – SOFC) unterschieden

¹⁶⁶ Vgl. Hofmann (2010), S. 129.

¹⁶⁷ Auch Stromrichter genannt.

¹⁶⁸ Vgl. Hofmann (2010), S. 139f.

¹⁶⁹ Continental (2012).

¹⁷⁰ Vgl. Braess und Seiffert (2011), S. 145.

¹⁷¹ Vgl. Gerl (2002), S. 89. Im Weiteren wird nur noch auf Brennstoffzellen mit dem Brennstoff Wasserstoff eingegangen, da sie für Pkw-Anwendungen am aussichtsreichsten sind.

¹⁷² D. h. ohne thermische Expansionsprozesse, wie sie bei der Verbrennung von Wasserstoff in einer Verbrennungskraftmaschine (VKM) auftreten würden. Brennstoffzellen unterliegen somit nicht dem schlechten Wirkungsgrad von VKM. Die Reaktion in der Brennstoffzelle wird auch als kalte Verbrennung bezeichnet.

werden oder nach ihrer Arbeitstemperatur (Nieder-, Mittel- oder Hochtemperatur). Die für Pkw-Anwendungen favorisierte Anwendung stellt die PEMFC dar.¹⁷³

Bei der PEMFC handelt es sich um eine Niedertemperatur-Brennstoffzelle, mit einer Betriebstemperatur von 40 bis 100 °C. Als Elektrolyt kommt eine sehr dünne mit leitfähigem Graphit beschichtete Polymermembran zum Einsatz. Diese Membran ist sehr empfindlich gegenüber Verunreinigung der Gase, insbesondere gegenüber Verunreinigung des Wasserstoffs mit Kohlenmonoxid (CO), was eine gründliche Wasserstoffreinigung vor dem Betanken notwendig macht. Auf den Elektroden wirkt eine dünne Platinbeschichtung als Katalysator, der die Reaktionsgeschwindigkeit, mit der die Wasserstoffatome in Elektronen und Protonen zerlegt werden, beschleunigt. Nachteilig an Platin sind die hohen Kosten dieses Edelmetalls und der hohe Aufwand der Platinförderung. Die kleinste Einheit einer Brennstoffzelle ist die Zelle als Membran-Elektrolyt-Anordnung (MEA). Die in praktischen Anwendungen erreichte Spannung einer Zelle liegt bei 0,5 V bis 1 V. Um höhere Spannungen zu erreichen, werden mehrere dieser Zellen oder MEA zu einem Stapel (engl. Stack) zusammengeschaltet.¹⁷⁴ Die Entwicklungsziele für Brennstoffzellen lassen sich auf die folgenden drei Punkte zusammenfassen: (I) Vergrößerung der Leistungsfähigkeit bei gleichzeitiger Reduzierung der Kosten (II) Steigerung von Robustheit und Zuverlässigkeit und (III) Verlängerung der Lebensdauer und Dauerhaltbarkeit.¹⁷⁵

Brennstoffzellen-Peripherie

Als Brennstoffzellen-Peripherie werden alle Komponenten bezeichnet, die der Brennstoffzellen-Stack zusätzlich benötigt, um aus Wasserstoff und Luftsauerstoff Strom herzustellen. Dazu zählen die Luftversorgung und Luftbefeuchtung, die Wasserstoffzufuhr und die Kühlung. Die Luftversorgung erfolgt über ein sogenanntes Luftmodul. Das Luftmodul hat die Aufgabe, die Umgebungsluft zu filtern und zu komprimieren.¹⁷⁶ Die Kompression erfolgt heute hauptsächlich mit elektrischen Schraubenturboladern, die in den Anforderungsbereichen den höchsten Wirkungsgrad haben. Zur Befeuchtung der angesaugten Luft wird das Wasser aus dem Abgas kondensiert und der Zuluft wieder zugeführt. Die Wasserstoffzufuhr erfolgt mit dem sogenannten Anodenmodul. Das Anodenmodul befeuchtet den Wasserstoff und dosiert den Kraftstoffmassenstrom in die Brennstoffzelle. Die Betriebstemperatur der PEM-Brennstoffzelle liegt heute bei max. 95 °C. Das hat den Vorteil, dass die Abwärme der Brennstoffzelle im Winter zum Heizen der Fahrgastzelle genutzt werden kann, aber auch den Nachteil, dass die relativ geringe Temperaturdifferenz des Kühlmittels zur Umgebung hohe Anforderungen an das Kühlsystem stellt. Zukünftig ist eine Temperaturanhebung der Betriebstemperatur der Brennstoffzelle wünschenswert, um den Kühlaufwand zu reduzieren. Ein vereinfachter Befeuchtungsaufwand sowie die Vereinfachung der Wasserstoffzuführung sind weitere wichtige Schritte hin zu einer Kommerzialisierung der Brennstoffzellentechnologie in Pkw-Antrieben.¹⁷⁷

¹⁷³ Vgl. Gerl (2002), S. 92f.

¹⁷⁴ Vgl. Böcker (2011), S. 63. und vgl. Braess und Seiffert (2011), S. 121.

¹⁷⁵ Vgl. Braess und Seiffert (2011), S. 124.

¹⁷⁶ Das geschieht zu einem Druck von 1,1 bar im Teillast- und 2,5 bar im Vollastbereich.

¹⁷⁷ Vgl. Braess und Seiffert (2011), S. 124f.

Wasserstofftank

Wasserstoff ist unter Normaldruck ein sehr leichtes Gas. Im Pkw kann Wasserstoff in Form des reinen Elements, in verdichteter gasförmiger oder in tiefkalter flüssiger Form und in Form von physikalischen oder chemischen Verbindungen gespeichert werden. Gasförmig kann der Wasserstoff auf Drücke von 200 bar bis 900 bar verdichtet und in Druckgasbehältern gespeichert werden.¹⁷⁸ Druckgasbehälter können in vier Typen unterschieden werden. Typ-1-Behälter bestehen aus dickwandigem Stahl oder Aluminium. Dadurch sind sie sehr robust und druckbeständig, aber auch verhältnismäßig schwer.¹⁷⁹ Aufgrund der besseren Gewichtsverhältnisse wurden in den letzten Jahren Typ-1-Behälter durch Composite-Werkstoffe¹⁸⁰ ergänzt. Bei Typ-2- und Typ-3-Behältern werden die Innenbehälter (Liner) aus Metall teilweise oder vollständig von einem Netz aus Kohlenstofffasern ummantelt, was zu einer höheren Festigkeit bei gleichzeitiger Gewichtsreduktion des Tanksystems führt. Typ-4-Behälter bestehen vollständig aus Kunststoff-Linern und Kunststoff-Drucktanks. In Typ-4-Behältern wird schon heute gasförmiger Wasserstoff mit Speicherdrücken von 700 bar nahezu verlustfrei in Pkw gespeichert. Aufgrund der günstigen Spannungsverteilung werden bei diesen hohen Drücken vor allem Zylinder oder kugelförmige Tankformen verwendet.¹⁸¹ Mittel- und langfristig bieten fahrzeugspezifische Speichereigenschaften wie die Reduktion von Gewicht und Einbaumaßen, Robustheit gegen mechanische Beschleunigungskräfte, hohe Lebensdauern und die Kostenreduzierung weiteres Verbesserungspotenzial mobiler Wasserstoffspeicher.¹⁸² Auf Flüssigwasserstoffspeicher und die Speicherung in physikalischen oder chemischen Verbindungen wird hier nicht weiter eingegangen. Sie können mit zunehmender technischer Entwicklung aber interessante Speicheroptionen für Wasserstoff in Pkw-Anwendungen werden.

Leichtbau¹⁸³

In den letzten Jahren sind die Fahrzeuge aufgrund zunehmend technischer Möglichkeiten und damit einhergehend steigender Kundenanforderungen nach mehr Sicherheit und Komfort immer schwerer geworden. Bei konventionellen Antrieben beträgt der Anteil der Karosserie am Gesamtfahrzeuggewicht in etwa 40 Prozent. Auf Antriebstrang und Kraftstofftank entfallen weitere 40 Prozent des Gewichts. Das restliche Gewicht gehört zur Innenausstattung.

Der Begriff Leichtbau bezieht sich im Sprachgebrauch oft auf die Reduzierung des Karosseriegewichts. Eine umfassende Leichtbauweise muss aber auch alle anderen Gewichtsanteile wie die Komponenten des Antriebstrangs, der Energiespeicher und der Innenausstattung abzielen. Für alternative Antriebe ist der Leichtbau besonders interessant, da mit jedem eingesparten Kilo die Batterie bzw. das BZ-System entsprechend kleiner ausgelegt werden kann, was wiederum Kosten spart.

BMW geht mit seinen Modell i3 und i8 derzeit einen Sonderweg und verlässt das Konzept der selbsttragenden Karosserie in Mischbauweise. Die beiden Fahrzeuge bestehen aus zwei

¹⁷⁸ Eichlseder und Klell (2008), S. 85ff.

¹⁷⁹ Vgl. Gerl (2002), S. 135.

¹⁸⁰ Auf Deutsch Verbundwerkstoffe.

¹⁸¹ Vgl. Eichlseder und Klell (2008), S. 91ff.

¹⁸² Vgl. Braess und Seiffert (2011), S. 125.

¹⁸³ Die Ausführungen zum Leichtbau stammen im Wesentlichen aus Friedrich (2013).

Modulen. Einem „Drive-Modul“, welches Fahrwerk, Antriebsstrang und Energiespeicher integriert, und einem „Life-Modul“, welches die Fahrgastzelle aus CFK-Verbundwerkstoff¹⁸⁴ darstellt. Kritische Punkte der CFK-Bauweise sind neben der Wirtschaftlichkeit die Gesamtenergiebilanz dieses Werkstoffs und die Reparaturproblematik.

2.3.2 Fahrzeuge mit Verbrennungsmotor

In Verbrennungsmotoren wird die im Kraftstoff gebundene chemische Energie in Wärme und mechanische Arbeit über Kolben, Pleuel und Kurbelwelle umgewandelt. Für Pkw-Antriebe haben sich die Bauformen Otto- und Dieselmotor durchgesetzt. Wesentliches Unterscheidungsmerkmal dieser beiden Antriebe ist die Art der Zündung, die bei Dieselmotoren durch das höhere Verdichtungsverhältnis als Selbstzündung funktioniert. Bei Ottomotoren ist das Verdichtungsverhältnis durch die Klopfestigkeit des Benzens begrenzt, was eine Fremdzündung notwendig macht.¹⁸⁵

Tabelle 9 zeigt die in der EUCAR V4 simulierten Benzin- und Dieselfahrzeuge. Die Verbrauchsverbesserungen von 2010 auf 2020 sind dabei im Wesentlichen auf die im Gliederungspunkt 2.3.1 beschriebenen Verbrauchsenkungs-Maßnahmen zurückzuführen.

Tabelle 9: Technische Entwicklung Benzin- und Dieselfahrzeuge¹⁸⁶

Antrieb/Parameter	Einheit	2010	2020	2030
<u>Ottomotor</u>	-	DISI	DISI	DISI
Hubraum	[l]	1,4	1,4	1,4
Leistung	[kW]	90	85	85
Anzahl Zylinder	-	4	3	3
<i>Simulation</i>				
Verbrauch (NEFZ)	[l/100km]	6,33	4,43	3,99 ^a
CO ₂ -Emissionen (NEFZ)	[gCO ₂ eq./km]	150	105	95 ^a
<u>Dieselmotor</u>	-	DICI	DICI	DICI
Hubraum	[l]	1,6	1,6	1,6
Leistung	[kW]	85	85	85
Anzahl Zylinder	-	4	4	4
<i>Simulation</i>				
Verbrauch (NEFZ)	[l/100km]	4,53	3,30	2,97 ^a
CO ₂ -Emissionen (NEFZ)	[gCO ₂ eq./km]	120	88	79 ^a

^a Es wird eine Verbrauchsverbesserung von zehn Prozent im Vergleich zum Jahr 2020 angenommen.

DISI – Direct Injection Spark Ignition (Benzindirekt-Einspritzung)

DICI – Direct Injection Compression Ignition (Dieseldirekt-Einspritzung)

¹⁸⁴ CFK steht für Carbon-Faserverstärkter Kunststoff. Englisch: carbon-fiber-reinforced plastic (CFRP).

¹⁸⁵ Vgl. Braess und Seiffert (2011); S. 158.

¹⁸⁶ JEC (2013) für die Jahre 2010 und 2020. Für 2030 eigene Fortschreibung.

2.3.3 Hybride

Das Wort Hybrid kommt aus dem Griechischen und bedeutet so viel wie „gemischt“ oder „von zweierlei Herkunft“. Ein Hybridfahrzeug besitzt per Definition mindestens zwei Energiespeicher und zwei Energiewandler. Dabei sind die Energiewandler der Verbrennungsmotor sowie der Elektromotor und die Energiespeicher der Tank sowie die Batterie. Die verschiedenen Hybridkonzepte unterscheidet die Literatur in Mikro-, Mild-, Voll- und Plug-In-Hybride. Diese Unterteilung richtet sich in der Regel nach der Leistung des Elektromotors sowie nach den elektrisch realisierten Nebenfunktionen.¹⁸⁷ Aufseiten der Fahrzeughersteller hat sich in den letzten Jahren auch eine Unterteilung nach der Fahrzeugarchitektur in Parallel-Hybride, Serielle-Hybride und Misch-Hybride durchgesetzt. Diese Unterteilung wird im Folgenden anhand der hier verwendeten EUCAR-V4-Fahrzeuge näher erläutert.

Parallel-Hybride (HEV)

Bei einem Parallel-Hybrid (HEV) sind sowohl der Elektro- als auch der Verbrennungsmotor mechanisch über das Getriebe mit den Rädern verbunden. Es liegt eine Parallelschaltung der Energiewandler vor, deren Leistung sich auf diese Weise addieren lässt.¹⁸⁸

Tabelle 10: Technische Entwicklung Benzin P1-Parallel-Hybrid (HEV) ¹⁸⁹

Parameter	Einheit	2010	2020	2030
<i>Verbrennungsmotor</i>		DISI	DISI	DISI
Hubraum	[l]	1,4	1,3	1,3
Leistung	[kW]	90	70	70
Anzahl Zylinder	-	4	3	3
<i>Elektromotor</i>		PSM	PSM	PSM
Leistung (Peak)	[kW]	24	24	24
<i>Batterie</i>		HP Li-Ionen	HP Li-Ionen	HP Li-Ionen
Energieinhalt	[kWh]	1,4	1	1
Leistung	[kW]	30	30	30
<i>Simulation</i>				
Verbrauch (NEFZ)	[l/100 km]	4,44	2,92	2,63 ^a
CO ₂ -Emissionen (NEFZ)	[gCO ₂ eq./km]	106	70	63 ^a

^a Es wird eine Verbrauchsverbesserung von zehn Prozent im Vergleich zum Jahr 2020 angenommen.

Generell sind die Komponenten von Parallel-Hybriden relativ einfach in bestehende verbrennermotorische Antriebssysteme integrierbar, ohne Änderungen am Karosseriebau vornehmen zu müssen. Die größten Änderungen entfallen auf die Integration des Hybridgetriebes mit Elektromotor, der Batterie und der Betriebsstrategie in das verbrennermotorische Antriebssystem. Tabelle 10 zeigt die technische Auslegung des Parallel-Hybriden aus

¹⁸⁷ Vgl. Wallentowitz, Freialdenhoven, et al. (2010), S. 52ff.

¹⁸⁸ Vgl. Gerl (2002), S. 76.

¹⁸⁹ JEC (2013) für die Jahre 2010 und 2020. Für 2030 eigene Fortschreibung.

der EUCAR-V4. Dargestellt und weiter untersucht wird nur das Benzin-Hybrid-Fahrzeug, um die Komplexität nicht zusätzlich zu erhöhen. Diesel-Hybride sind grundsätzlich technisch umsetzbar und auch Gegenstand der EUCAR-V4. Aufgrund des höheren Preises des Diesel-Antriebsstrangs wird in der Praxis bis auf wenige Ausnahmen bisher auch von Diesel-Hybriden abgesehen.

Bei Parallel-Hybriden kann konzeptabhängig rein verbrennermotorisch, rein elektrisch oder kombiniert gefahren werden. Je nach Anordnung des Verbrennungsmotors haben sich die Bezeichnungen P1 bis P4 etabliert.¹⁹⁰

P1-Hybrid: Hier ist der Elektromotor drehfest mit dem Verbrennungsmotor verbunden. Die Hybridfunktionen sind größtenteils als Start-/Stopp-, Bremsrückgewinnungs- und Beschleunigungsunterstützungsfunktionen ausgeführt. Prominentester Vertreter eines P1-Hybriden ist der Mercedes-Benz-S400-Hybrid.

P2-Hybrid: Hier ist der Elektromotor am Getriebeeingang durch eine Kupplung vom Verbrennungsmotor getrennt. Dadurch wird eine rein elektrische Fahrt und die volle Rekuperation¹⁹¹ ohne Motorschleppverluste möglich. Diese Anordnung findet sich zum Beispiel im VW-Touareg-Hybrid.

P3-Hybrid: Hier ist Elektromotor hinter dem Getriebe. Während der Schaltphasen kann so die Zugkraft erhalten werden, was vor allem eine Komfortsteigerung bedeutet. Außerdem können bei geöffneter Kupplung rein elektrische Fahrleistungen erbracht werden.

P4-Hybrid: Hier ist der Elektromotor an einer Achse und der Verbrennungsmotor an der anderen Achse angebracht. Dadurch kann der Elektromotor die Traktion zusätzlich unterstützen. Nachteilig an diesem Konzept ist, dass die Start-/Stopp-Funktion und Lastpunktverschiebungen des Verbrennungsmotors nur mit einem zusätzlichen Elektromotor am Verbrennungsmotor realisiert werden können.¹⁹²

Plug-In-Hybride (PHEV)

Plug-In-Hybrid-Electric-Vehicle (PHEV) gehören zu der Gruppe der Mischhybride. Sie sind den Parallel-Hybriden strukturell sehr ähnlich, besitzen aber eine größere Batterie, die auch extern über einen Netzanschluss (Plug-In) geladen werden kann. Durch die größere Batterie und einem leistungsstärkeren Elektromotor können mit PHEV schon kleinere Strecken rein batterieelektrisch gefahren werden (Tabelle 11).

Die aktuelle EU-Gesetzgebung begünstigt dieses Fahrzeugkonzept zusätzlich, weil bei PHEV die CO₂-Emissionen aus der Verbrennung der Kraftstoffe gewichtet in Abhängigkeit von der elektrischen Reichweite und dem elektrischen Verbrauch des Fahrzeugs, den Fahrzeugemissionen im Normzyklus abgezogen werden können.¹⁹³ Durch diese „Nicht-Anrechnung“ des elektrischen Stroms für die Traktion können OEMs zukünftig ihre Flottenemissionen signifikant senken.¹⁹⁴

¹⁹⁰ Vgl. Braess und Seiffert (2011), S. 133ff.

¹⁹¹ Beim Bremsen wird der Elektromotor als Generator (Stromerzeuger) verwendet.

¹⁹² Vgl. Reif, Noreikat, et al. (2012), S. 36.

¹⁹³ Im Gliederungspunkt 4.4 Tank-to-Wheel-Energieverbrauch von alternativen Antrieben werden dazu umfangreiche Untersuchungen durchgeführt.

¹⁹⁴ Braess und Seiffert (2011), S. 140.

Tabelle 11: Technische Entwicklung Benzin Plug-In-Hybrid (PHEV) ¹⁹⁵

Parameter	Einheit	2010	2020	2030
<i>Verbrennungsmotor</i>		DISI	DISI	DISI
Hubraum	[l]	1,4	1,4	1,4
Leistung	[kW]	90	70	70
Anzahl Zylinder	-	4	3	3
<i>Elektromotor</i>		PSM	PSM	PSM
Leistung (Peak)	[kW]	40	38	38
<i>Batterie</i>		HE Li-Ionen	HE Li-Ionen	HE Li-Ionen
Energieinhalt	[kWh]	3,7	2,7	2,7
Leistung	[kW]	50	50	50
<i>Simulation</i>				
El. Reichweite (NEFZ)	[km]	20	20	22 ^a
Verbrauch ECE-R101	[l +	3,17	2,11	1,90 ^a
El. Verbrauch ECE-R101 ^b	kWh/100 km]	4,07	2,70	2,43 ^a
CO ₂ -Emissionen ECE-R101	[gCO ₂ eq./km]	75	50	45 ^a

^a Es wird eine Verbrauchsverbesserung von zehn Prozent im Vergleich zum Jahr 2020 angenommen.^b Inklusive Ladeverluste.**Tabelle 12:** Technische Entwicklung Benzin Range-Extender-Electric-Vehicle (REEV) ¹⁹⁶

Parameter	Einheit	2010	2020	2030
<i>Verbrennungsmotor</i>		DISI	DISI	DISI
Hubraum	[l]	1,4	1,2	1,2
Leistung	[kW]	55	47	47
Anzahl Zylinder	-	4	3	3
<i>Generator</i>				
Leistung	[kW]	57	50	50
<i>Elektromotor</i>		PSM	PSM	PSM
Leistung (Peak)	[kW]	90	75	75
<i>Batterie</i>		HE-Li-Ionen	HE-Li-Ionen	HE-Li-Ionen
Energieinhalt	[kWh]	14,9	11,8	11,8
Leistung	[kW]	100	90	90
<i>Simulation</i>				
El. Reichweite (NEFZ)	[km]	80	80	88 ^a
Verbrauch ECE-R101	[l +	1,09	0,85	0,77 ^a
El. Verbrauch ECE-R101 ^b	kWh/100 km]	11,58	9,12	8,21 ^a
CO ₂ -Emissionen ECE-R101	[gCO ₂ eq./km]	26	20	18 ^a

^a Es wird eine Verbrauchsverbesserung von zehn Prozent im Vergleich zum Jahr 2020 angenommen.^b Inklusive Ladeverluste.¹⁹⁵ JEC (2013) für die Jahre 2010 und 2020. Für 2030 eigene Fortschreibung.¹⁹⁶ JEC (2013) für die Jahre 2010 und 2020. Für 2030 eigene Fortschreibung.

Range-Extender

Range-Extender-Electric-Vehicle (REEV) gehören zu der Gruppe der Seriellen-Hybride. Serienle-Hybride nutzen für die Traktion ausschließlich den Elektromotor, der mit einer entsprechend großen Leistung ausgestattet ist (Tabelle 12).

Der Verbrennungsmotor wird nicht für die Traktion verwendet, er dient nur dazu, über einen Generator die Batterie wieder aufzuladen, wenn diese unter einen bestimmten SOC fällt. Bei der Batterie handelt es sich um eine Energie-Batterie (HE), mit deutlich größerem Energieinhalt als bei PHEV. Dadurch können, wie in Tabelle 12 zu sehen ist, schon beachtliche Reichweiten von 80 km rein batterie-elektrisch zurückgelegt werden. Der Vorteil dieses Konzepts ist, dass der Verbrennungsmotor zum Laden der Batterie in einem unter Verbrauchs- und Emissionsgesichtspunkten günstigen Drehzahlbereich betrieben werden kann.¹⁹⁷ Um den Effizienzvorteil des elektrischen Antriebsstrang nutzen zu können, sollte aber ein Großteil der Strecken innerhalb der elektrischen Reichweite abgedeckt werden und der Verbrennungsmotor nur im „Notfall“ eingesetzt werden.

2.3.4 Batteriefahrzeuge

Im Vergleich zu allen anderen hier untersuchten Fahrzeugantrieben zeichnet sich das Batteriefahrzeug (BEV) durch einen relativ einfachen Systemaufbau aus, welcher im wesentlichen nur aus den Komponenten Energiespeicher, Elektromotor und Steuergeräten besteht.¹⁹⁸ Der Strom wird dabei in der Ladeeinheit über einen Wechselrichter in Gleichstrom umgewandelt und in die Batterie geladen. Ein anderer Energiespeicher wie bei den Hybriden befindet sich nicht an Bord. Außerdem werden aus der Batterie noch Nebenverbraucher wie Heizung und Klimatisierung sowie die Lenk- und Bremsunterstützung gespeist. In Tabelle 13 ist der NEFZ-Verbrauch zu sehen, ohne die eben genannten Nebenverbraucher.¹⁹⁹

Tabelle 13: Technische Entwicklung Batteriefahrzeug (BEV) ²⁰⁰

Parameter	Einheit	2010	2020	2030
<i>Batterie</i>		HE-Li-Ionen	HE-Li-Ionen	HE-Li-Ionen
Energieinhalt	[kWh]	17,8	22,1	22,1
Leistung	[kW]	100	90	90
<i>Elektromotor</i>		PSM	PSM	PSM
Leistung (Peak)	[kW]	90	70	70
<i>Simulation</i>				
El. Reichweite (NEFZ)	[km]	120	200	220 ^a
Verbrauch (NEFZ) ^b	[kWh/100 km]	14,49	10,59	9,53 ^a
CO ₂ -Emissionen (NEFZ)	[gCO ₂ eq./km]	0	0	0

^a Es wird eine Verbrauchsverbesserung von zehn Prozent im Vergleich zum Jahr 2020 angenommen.
^b Inklusive Ladeverluste.

¹⁹⁷ Vgl. Gerl (2002), S. 75.
¹⁹⁸ Vgl. Wallentowitz, Freialdenhoven, et al. (2010), S. 59.
¹⁹⁹ Siehe dazu Gliederungspunkt 4.3 Tank-to-Wheel-Energieverbrauch von alternativen Antrieben.
²⁰⁰ JEC (2013) für die Jahre 2010 und 2020. Für 2030 eigene Fortschreibung.

2.3.5 Brennstoffzellenfahrzeuge

Streng genommen sind Brennstoffzellenfahrzeuge (FCEV) auch Serielle-Hybride mit zwei Energiespeichern und zwei Energiewandlern. Die beiden Energiespeicher eines FCEV sind der H₂-Tank und die Batterie. Als Energiewandler fungieren die Brennstoffzelle und der Elektromotor. In der Brennstoffzelle wird die chemische Energie des Wasserstoffs mithilfe von Sauerstoff in einer kalten Verbrennung in Wasser und elektrische Energie umgewandelt, die wiederum direkt für die Traktion des Elektromotors verwendet wird. Weiterhin wird der in der Brennstoffzelle erzeugte Gleichstrom für Nebenverbraucher wie dem Luftverdichter oder dem Klimakompressor verwendet. Mit einem Teil des Gleichstroms wird aber auch die HP-Li-Ionen Batterie aufgeladen, die zur Leistungsüberbrückung bzw. kurzfristigen Deckung von Spitzenlastanforderungen aus dem Elektromotor dient. Außerdem speichert die Batterie die Rekuperationsenergie des Elektromotors beim Bremsen des Fahrzeugs. Diese Energie wird dann wiederum für die Traktion in bestimmten Fahrphasen (zum Beispiel beim Anfahren) genutzt, was eine Verbrauchssenkung nach sich zieht.

Tabelle 14: Technische Entwicklung Brennstoffzellenfahrzeug (FCEV) ²⁰¹

Parameter	Einheit	2010	2020	2030
<i>BZ-Stack</i>		PEM	PEM	PEM
Leistung	[kW]	70	55	55
<i>Batterie</i>		HP-Li-Ionen	HP-Li-Ionen	HP-Li-Ionen
Energieinhalt	[kWh]	1,4	1	1
Leistung	[kW]	30	30	30
<i>Elektromotor</i>		PSM	PSM	PSM
Leistung (Peak)	[kW]	85	70	70
<i>H₂-Tank</i>				
Energieinhalt	[kg H ₂]	3,0	2,3	2,3
<i>Simulation</i>				
El. Reichweite (NEFZ)	[km]	500	500	550 ^a
Verbrauch (NEFZ)	[kg H ₂ /100 km]	0,624	0,448	0,403 ^a
CO ₂ -Emissionen (NEFZ)	[gCO ₂ eq./km]	0	0	0

^a Es wird eine Verbrauchsverbesserung von zehn Prozent im Vergleich zum Jahr 2020 angenommen.

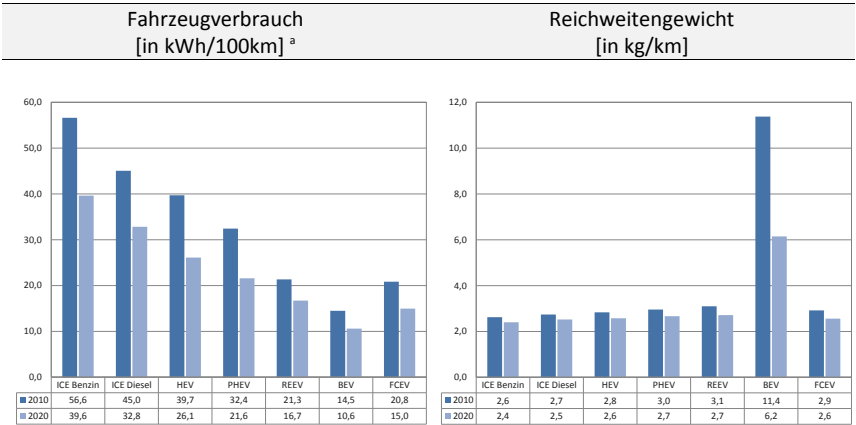
2.3.6 Systemvergleich

Da sich die oben beschriebenen Fahrzeugkonzepte zum Teil signifikant in der Wahl ihrer Antriebssysteme und Energiespeicher unterscheiden, erfolgt im Folgenden ein Systemvergleich anhand verschiedener Kennzahlen auf Gesamtfahrzeug-, Antriebsstrang- und Energiespeicherebene.²⁰²

²⁰¹ JEC (2013) für die Jahre 2010 und 2020. Für 2030 eigene Fortschreibung.
²⁰² Der Vergleich erfolgt auf Basis der in der EUCAR V4 (2013) verwendeten Daten und bezieht sich auf die Jahresscheiben 2010 und 2020+. Das Jahr 2030 wurde in der Studie noch nicht betrachtet.

Fahrzeugverbrauch und Reichweitengewicht

Abbildung 10 zeigt auf der linken Seite den Fahrzeugverbrauch der verschiedenen Antriebsstrang-Kraftstoff-Kombinationen im NEFZ normiert auf die Einheit kWh/100km. Das BEV ist der energieeffizienteste der hier untersuchten Antriebe. REEV und FCEV liegen in etwa gleich auf. Bis zum Jahr 2020 machen die verbrennermotorisch angetriebenen Antriebe durch die vorher beschriebenen Effizienzsteigerungsmaßnahmen noch einmal einen signifikanten Effizienzsprung. Das Reichweitengewicht (Abbildung 10, rechts) ist der Quotient aus dem Fahrzeug-Leergewicht (inklusive 90 Prozent Kraftstoffinhalt) und der Reichweite im NEFZ. An dieser Kennzahl kann man ablesen, wie sich das Verhältnis der Fahrzeugmasse zur Reichweite für die verschiedenen Antriebe aufteilt. Idealerweise ist das Verhältnis so klein wie möglich. Das BEV hat bei dieser Auswertung aufgrund der schweren Batterie das mit Abstand meiste Gewicht, bezogen auf seine Reichweite.



^a Verbrauch im NEFZ. Bei PHEV und REEV Aufteilung elektr. und verbr. Fahrleistung nach ECE-R101; Fahrzeuggewicht: siehe Tabelle 46 bis Tabelle 52 im Anhang. Alle Zahlen aus EUCAR (2013).

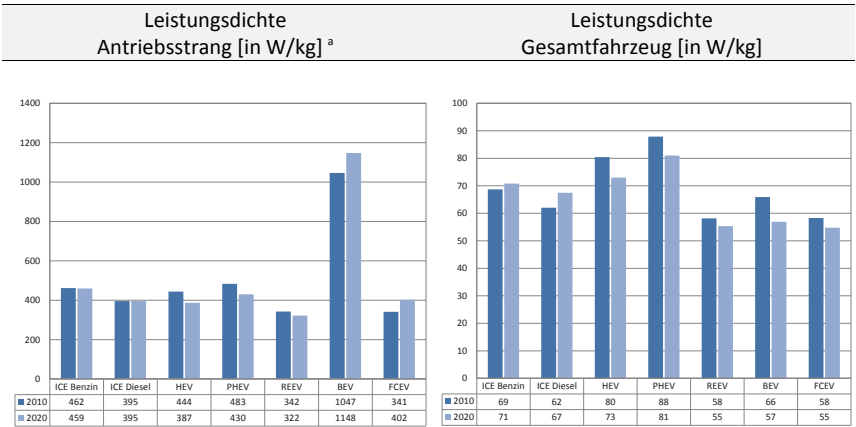
Abbildung 10: Fahrzeugverbrauch und Reichweitengewicht

Leistungsdichte von Antriebsstrang und Gesamtfahrzeug

Der Antriebsstrang besteht bei den verschiedenen Fahrzeugantrieben aus unterschiedlichen Komponenten. Für ICE-Benzin und ICE-Diesel besteht der Antriebsstrang nur aus dem Verbrennungsmotor und dem Getriebe²⁰³. Bei den elektrifizierten Antriebssystemen (HEV, PHEV und REEV) kommt zusätzlich ein Elektromotor bzw. Generator zum Einsatz. Bei BEV und FCEV erfolgt die Traktion ausschließlich über Elektromotor und Getriebe. Bei FCEV wird das BZ-System auch noch zum Antriebsstrang gezählt, da es die Energie für den E-Motor herstellen muss. Abbildung 11 zeigt auf der linken Seite das Verhältnis zwischen der für die Traktion installierten Leistung des Verbrennungs- bzw. Elektromotors und dem Gewicht des gesam-

²⁰³ Antriebsachsen gehören ebenfalls zum Antriebsstrang. Sie werden in dieser Analyse nicht berücksichtigt.

ten Antriebsstrangs, bestehend aus Verbrennungsmotor, Getriebe, E-Motor, Generator und BZ-System – wenn vorhanden. Das BEV hat in dieser Analyse die mit Abstand höchste Leistungs-dichte. Bezogen auf das Gesamtfahrzeuggewicht ist die Leistungsdichte des BEV durch die schwere Batterie wieder signifikant schlechter im Vergleich zu den hier am besten ab-schneidenden Fahrzeugen HEV und PHEV (Abbildung 11, rechts).



^a Quotient aus Leistung (Peak) VKM + E-Motor für die Traktion und Gewicht des gesamten Antriebsstrang (VKM, E-Motor, Generator, Getriebe, BZ-System). Alle Zahlen aus EUCAR (2013).

Abbildung 11: Leistungs-dichte von Antriebsstrang und Gesamtfahrzeug

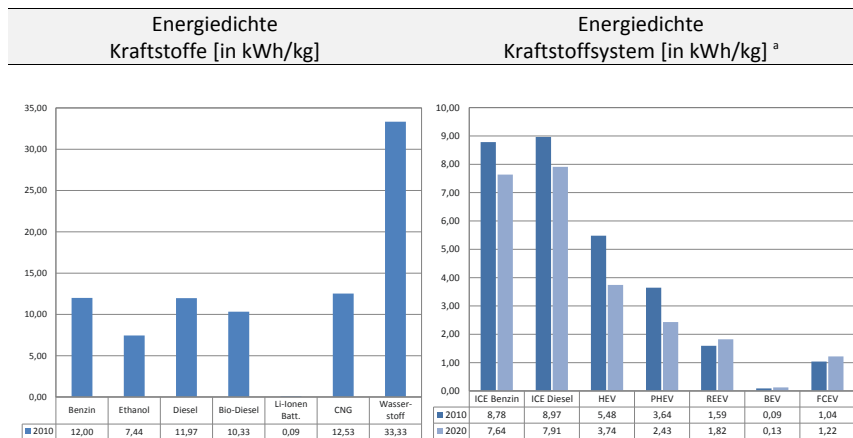
Energiedichte Kraftstoff und Kraftstoffspeicher

Die Energiedichte verschiedener flüssiger und gasförmiger Kraftstoffe für Pkw ist in Abbildung 12 links dargestellt. Da die Ein- bzw. Auslagerung beim Be- bzw. Entladen von Li-Ionen in einer Li-Ionen-Batterie mit keiner Gewichtsänderung einhergeht, wird hier die gravimetrische Energiedichte der gesamten Batterie aus der EUCAR V4 dargestellt. Üblich in diesem Zusammenhang ist auch die Darstellung der Energiedichte auf Batteriezellen-Ebene. Dort ist die Energiedichte durch das Fehlen des BMS²⁰⁴, des Batteriegehäuses und der Kühlung etwas höher. Sie liegt für das Jahr 2011 bei etwa 0,14 kWh/kg.²⁰⁵

Abbildung 12 rechts zeigt die Energiedichte von Kraftstoff und dazugehörigem Kraftstoffs-system.²⁰⁶ Die Abbildung zeigt zugleich eines der zentralen Probleme batterieelektrischer Antriebe – in REEV und BEV kann durch die geringe Energiedichte der HE-Batterien nur ein Bruchteil der Energie von flüssigen oder gasförmigen Energieträgern gespeichert werden. Nicht dargestellt ist die volumetrische Energiedichte. Sie ist für die Integration des Kraft-

²⁰⁴ Batteriemanagementsystem. Gemeint ist hier die Elektronik die für das Be- bzw. Entladen und das Überwachen des Batterieladezustands notwendig ist.
²⁰⁵ Fraunhofer Fraunhofer-ISI (2012), S. 8 Wert für das Jahr 2011.
²⁰⁶ Mit Kraftstoffs-system sind der Benzin- sowie Dieseltank, der H₂-Tank und die HP- und HE-Batterien gemeint.

stoffsystems in das Fahrzeug ebenfalls von zentraler Bedeutung. So haben Gase wie Wasserstoff oder CNG zwar eine hohe gravimetrische Energiedichte (Abbildung 12, links), bezogen auf ihr Volumen nehmen sie aber einen relativ großen Raum ein.



^a Quotient aus dem Energieinhalt der mitgeführten Kraftstoffmenge und dem Gewicht des gesamten Kraftstoffsystems (gefüllter Benzin-Dieseltank, H₂-Tank, HP- und HE-Batterie). Alle Zahlen aus EUCAR (2013).

Abbildung 12: Energiedichte von Kraftstoff und Kraftstoffsystem

2.4 Zusammenfassung und Diskussion der Forschungsfragen

In diesem Punkt werden die Untersuchungsergebnisse des Kapitels noch einmal zusammenfassend dargestellt. Dabei werden die Forschungsfragen aus dem Beginn des Kapitels wieder aufgenommen und in Form von Stichpunkten beantwortet.

1. Welchen Einfluss hat der Pkw-Verkehr auf den Energieverbrauch und die CO₂-Emissionen?

- Auf den Verkehrssektor entfiel im Jahr 2012 ein Anteil von 19 Prozent am Primärenergieverbrauch in Deutschland. Damit ist der Verkehrssektor neben den Haushalten der Sektor, der in den letzten Jahren mehr Energie verbraucht hat. Der gesamte Primärenergieverbrauch in Deutschland hat sich seit 1990 allerdings um 7,7 Prozent verringert. Das ist neben Effizienzverbesserungen in den Sektoren auch auf die Ersetzung von Kohle hin zu Erdgas und erneuerbaren Energien zurückzuführen.
- Im Jahr 2010 verursachte der Verkehr 22 Prozent der globalen CO₂-Emissionen. Damit ist der Verkehr nach der Strom- und Wärme-Produktion (41 Prozent) der zweitgrößte Emittent, gefolgt von der Industrie mit 20 Prozent. Etwa zwei Drittel der weltweiten Verkehrsemissionen entfallen auf den Straßenverkehr von Pkw, Lkw, Motorrädern und Bussen. In Deutschland schwankt der Anteil durch den Straßenverkehr verursachter CO₂-Emissionen an den Gesamtemissionen in den vergangenen 20 Jah-

ren mehr oder weniger unverändert zwischen 17 bis 20 Prozent. Kritisch ist in diesem Zusammenhang der drastische Zuwachs des weltweiten Pkw-Bestandes (bis 2050 vermutlich Verdopplung zu 2010) zu sehen. In Deutschland sind in 2010 nur fünf Prozent der weltweiten Pkw-Flotte zugelassen. Dieser Anteil wird sich bis zum Jahr 2030 weiter verringern.

- Erneuerbare Energie und Materie steht uns in Deutschland im Prinzip in ausreichender Menge für den Verkehr zur Verfügung, allerdings nicht in der Form, wie wir sie benötigen oder heute gewohnt sind, zu verarbeiten. Im Jahr 2012 könnten mit dem erneuerbar erzeugten Strom von 100 TWh/a in Deutschland schon 41 Mio. BEV und 18 Mio. FCEV betrieben werden. Mittel- bis langfristig scheint es sogar möglich, den gesamten Pkw-Verkehr in Deutschland aus strombasierten erneuerbaren Energien, die sogar in Deutschland hergestellt werden, zu bedienen.
- Es wurde gezeigt, dass der Kraftstoffverbrauch von Pkw im NEFZ in den letzten Jahren kontinuierlich gesunken ist. Die Realverbräuche sind dagegen nur geringfügig gesunken. Gleichzeitig hat sich auch die Fahrleistung vergrößert, was den Energieverbrauch im Gesamtverkehr hat steigen lassen. Ohne den Einsatz von alternativen Antrieben ist dieser Entwicklung nur schwer entgegenzuwirken.

2. *Welche externen Einflussfaktoren wirken auf die Entwicklung und die Marktdurchdringung von alternativen und konventionellen Fahrzeugantrieben?*

- Untersucht wurde der Einfluss von Klimawandel, Energieversorgung, Gesetzliche Rahmenbedingungen, Gesellschaft und Geschäftsmodelle und Mobilitätsoptionen. Um die Klimaschutzziele zu erreichen, hat der Gesetzgeber eine Vielzahl von regulatorischen Rahmenbedingungen und fiskalpolitischen Instrumenten erlassen. Dabei wirkt der Großteil der untersuchten Instrumente auf den Endkunden (Fahrzeugkäufer und Fahrer). Die Anbieter von Fahrzeugen und Kraftstoffen werden bei den meisten Instrumenten bestenfalls indirekt zu handelnden. Die direkt auf die Anbieter wirkenden Instrumente wie die Beimischung von Biokraftstoffen, die EU-Flottengrenzwerte und die ZEV-Gesetzgebung zwingt die Anbieter jedoch zu einem direkten Handeln auf das jeweilige Instrument. Die Verwendung von erneuerbaren Energien im Verkehr wird bis auf die Gesetze zur Beimischung von Biokraftstoffen in keinen der bisher in Deutschland installierten und hier diskutierten Instrumente forciert.
- In den letzten Jahren hat der Anteil an Diesel-Pkw in der deutschen Flotte signifikant zugenommen. Genaue Ursachen dieses Effekts wurden nicht untersucht. In dem Zusammenhang ist der geringere Kraftstoffverbrauch und der geringere Kraftstoffpreis von Diesel- gegenüber Benzinfahrzeugen zu betrachten. Außerdem ist zu beobachten, dass Diesel-Pkw deutlich höhere Laufleistungen haben als Benzin-Pkw.
- Der Firmenwagenmarkt ist mit einer Größe von über 60 Prozent im Jahr 2012 maßgeblich an den Zulassungen von Neufahrzeugen in Deutschland beteiligt. Er stellt damit auch einen wichtigen Markt für alternative Antriebe dar.

3. *Wie ist der Entwicklungsstand von alternativen und konventionellen Fahrzeugantrieben und deren Schlüsseltechnologien?*

- Die untersuchten Fahrzeugantriebe HEV, PHEV, REEV, BEV und FCEV unterscheiden sich zum Teil erheblich in ihren technischen Eigenschaften. BEV sind zwar die energieeffizientesten Antriebe; aufgrund der sehr geringen gravimetrischen Energiedichte der Traktionsbatterien ist ihre Reichweite auch in Zukunft nicht mit der für Pkw gewohnten Reichweite zu vergleichen.
- Die vorgestellten Fahrzeugantriebe aus der EUCAR-V4 beinhalten noch keine Kosten, sind aus technischer Sicht aber fundierter ermittelt und aktueller als die EU-Coalition-Fahrzeuge (2010). Im Kapitel 3 werden die EUCAR-V4-Fahrzeuge mit den spezifischen Komponentenkosten der EU-Coalition-Studie berechnet. Die Fahrzeugkosten gehen dann in die weiteren Untersuchungen ein.

4. *Weiterer Forschungsbedarf*

- Weiterer Forschungsbedarf liegt in der Wirkung der verschiedenen regulatorischen und fiskalpolitischen Instrumente auf ihren Einfluss auf die Flottendurchdringung von alternativen Antrieben. Ihre Wirkung könnte nach Enzensberger und Wietschel (2003) nach den Kriterien Effektivität, Effizienz sowie Praktikabilität analysiert werden. Von besonderem Interesse ist dabei die Wirkung der geplanten Super-Credits für Elektrofahrzeuge. Nach Propfe, Kreyenberg et al. spielen dafür aber auch die Kraftstoffpreise von Benzin/Diesel, Wasserstoff und Strom eine besondere Rolle.²⁰⁷
- Ferner ist die Untersuchung des Mobilitätsverhaltens der Menschen von besonderem Interesse. Unter dem Stichwort „Nutzen statt Besitzen“ könnte sich der Besetzungs- und Nutzungsgrad der Pkw zukünftig signifikant erhöhen und damit den Pkw-Bestand bei gleicher Beförderungsleistung verringern. Die weitere Verbreitung des mobilen Internets in Smartphones und die genaue Positionsbestimmung von multimodalen Mobilitätsoptionen (Fahrrad, ÖPNV, Pkw) bilden dabei die technologische Grundlage.

²⁰⁷ Propfe, Kreyenberg, et al. (2013).

Fahrzeugantriebe für die Elektromobilität
Total Cost of Ownership, Energieeffizienz,
CO₂-Emissionen und Kundennutzen

Kreyenberg, D.

2016, XXIV, 243 S. 55 Abb., Softcover

ISBN: 978-3-658-14283-4