HOCHSCHULE PFORZHEIM

Michael Rau [redacted]

Matrikel-Nr. [redacted] [redacted]

[redacted]

Abgabedatum: 01.09.2009

Alternative Antriebe:

Gegenüberstellung, Wirtschaftlichkeit und Energieeffizienz

Diplomarbeit

vorgelegt zur Erlangung des Diplomabschlusses der Hochschule Pforzheim

Betreuer: Prof. Dr. [redacted]

Zweitkorrektor: Prof. Dipl.-Ing. [redacted]

Eidesstattliche Erklärung

Ich versichere, die beiliegende Diplomarbeit selbstständig verfasst, keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt, sowie alle wörtlich oder sinngemäß übernommenen Stellen in der Arbeit gekennzeichnet zu haben.

Calw, 28.08.2009 _____

(Michael Rau)

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis III

Abbildungsverzeichnis V

Tabellenverzeichnis VII

Abkürzungsverzeichnis VIII

1 Einleitung: Mobilität und Wohlstand 1

2 Notwendigkeit alternativer Antriebe 4

2.1 Knappheit fossiler Energieträger 4

2.2 Emissionen von Klimagasen 6

2.3 Wirkungsgrad der Verbrennungsmotoren 7

2.4 Zunahme des Verkehrs 9

3 Anforderungen an alternative Antriebe 10

4 Alternative Kraftstoffe 11

4.1 Alternative fossile Kraftstoffe 11

4.1.1 Erdgas 11

4.1.2 Autogas 18

4.1.3 Gas to Liquid (GTL) 20

4.2 Biokraftstoffe 21

4.2.1 Allgemein 21

4.2.2 Pflanzenöl 23

4.2.3 Biodiesel 24

4.2.4 Bioethanol 29

4.2.5 Biomass to Liquid (BTL) 32

4.2.6 Dimethylether (DME) 33

4.2.7 Biogas und Biomethan 34

4.2.8 Biokraftstoff aus Algen 34

4.3 Wasserstoff 35
5 Alternative Antriebe 39
5.1 Elektrischer Antrieb 39
5.1.1 Elektromotor 39
5.1.2 Batterie 41
5.1.3 Brennstoffzelle 43
5.2 Hybridantrieb 45
5.2.1 Allgemein 45
5.2.2 Serieller Hybrid 46
5.2.3 Paralleler Hybrid 47
5.2.4 Exkurs: Hybridantrieb in Opel Ampera und Toyota Prius 48
5.3 Elektromobilität 50
5.3.1 Allgemein 50
5.3.2 Vehicle to Grid (V2G) 54
5.3.3 Better Place 56
6 Bewertung und Gegenüberstellung 57
7 Schlussfolgerung 65

Anlagenverzeichnis 68
Literaturverzeichnis 79

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Weltweite Entwicklung des Bestandes der Kraftfahrzeuge 1
Abbildung 2: Zusammenhang zwischen Wirtschaftswachstum und Mobilität 2
Abbildung 3: Verteilung des weltweiten Erdölverbrauchs nach Sektor 4
Abbildung 4: Weltweite Ölförderung zwischen 1926 und 2026 5
Abbildung 5: Gesamtpotenzial konventionelles Erdöl im Jahr 2007 6
Abbildung 6: Emissionen im Zusammenhang mit Straßenfahrzeugen in EU-27 ... 7
Abbildung 7: Treibhausgasemissionen nach Sektor in EU-15 7
Abbildung 8: Umwandlungsverluste in einem Personenwagen 8
Abbildung 9: Hochgerechneter Gesamtbestand an Personenwagen nach Regionen 9
Abbildung 10: Vergleich der Masse und Volumina von CNG und Benzin/Diesel 13
Abbildung 11: Verbreitung von Erdgasfahrzeugen 2007 14
Abbildung 12: Erdgasfahrzeug-Bestand nach Regionen 2000-2007 15
Abbildung 13: CNG-Tankstellen und -fahrzeugdichte in ausgewählten Ländern 2007 16
Abbildung 14: Gegenüberstellung der Schadstoffemissionen von Erdgas zu Benzin/Diesel 17
Abbildung 15: Erdgasfahrzeuge nach Fahrzeugtyp 2008 17
Abbildung 16: Vergleich der Masse und Volumina von LPG und Benzin/Diesel 19
Abbildung 17: Autogasfahrzeug-Bestand in Deutschland 2006-2009 19
Abbildung 18: Biokraftstoffe und deren Herstellungspfade 22
Abbildung 19: Herstellungsprozess von Biodiesel 25
Abbildung 20: Verwendung von Biodiesel nach Nutzergruppen 2007 27
Abbildung 21: Herstellungsprozess von Bioethanol 29
Abbildung 22: Verfahrensschema der BTL-Herstellung 32
Abbildung 23: Kraftstoffertrag aus Algen im Vergleich zu ausgewählten Ausgangsrohstoffen 35
Abbildung 24: Wege der Wasserstoffbereitstellung 36
Abbildung 25: CO_2-Emissionen der Herstellung von flüssigem (LH_2) und gasförmigem Wasserstoff (CGH_2) 38

Abbildung 26: Vergleich der Energiedichte und spezifischer Energie verschiedener Speicher 42
Abbildung 27: Serielle Anordnung eines Hybridantriebes 46
Abbildung 28: Parallele Anordnung eines Hybridantriebes 47
Abbildung 29: Seriell-paralleles Hybridsystem im Toyota Prius 49
Abbildung 30: Treibhausgasemissionen von Elektrofahrzeugen 51
Abbildung 31: Stromerzeugung nach Primärenergie 2000-2050 52
Abbildung 32: Darstellung der Mehrkosten von Wasserstoff-Fahrzeugen 53
Abbildung 33: Verkehrsverhalten eines durchschnittlichen Pkw-Nutzers 54
Abbildung 34: Beispiel des Funktionsprinzips von Vehicle to Grid (V2G) 55
Abbildung 35: Energieeffizienz alternativer Kraftstoffe 58
Abbildung 36: Energieeffizienz alternativer Antriebe 59
Abbildung 37: Treibhausgasemissionen alternativer Kraftstoffe 61
Abbildung 38: Treibhausgasemissionen alternativer Anriebe 62
Abbildung 39: Einsatzgebiet verschiedener elektrischer Antriebe 66
Abbildung 40: Zeithorizont von alternativen Kraftstoffen und Antrieben 67

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Ölpflanzen und deren Erträge 23
Tabelle 2: Verwendungsformen von Biodiesel in Deutschland 26
Tabelle 3: Übersicht Biodiesel aus verschiedenen Rohstoffen 28
Tabelle 4: Rohstoffe zur Herstellung von Bioethanol und deren Erträge 30
Tabelle 5: Verwendungsformen von Bioethanol in Deutschland 31
Tabelle 6: Elektromotoren für Elektrofahrzeuge im Vergleich 40
Tabelle 7: Leistungsdaten von Batterien 43
Tabelle 8: Brennstoffzellentypen und deren Eigenschaften 44
Tabelle 9: Besonderheiten und Anwendungen von verschiedenen Brennstoffzellentypen 45
Tabelle 10: Gegenüberstellung ausgewählter Kraftstoffe 64

Abkürzungsverzeichnis

ACEA	Association des Constructeurs Européens d'Automobiles
AME	Altfettmethylester
ANG	Adsorbed Natural Gas
BGR	Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe
BMELV	Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz
BMVBS	Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung
BMWi	Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie
bzw.	beziehungsweise
ca.	circa
CGH_2	Compressed Gaseous Hydrogen
CH_3OH	Methanol
CO	Kohlenmonoxid
CO_2	Kohlendioxid
CO_{2eq}	Kohlendioxidäquivalent
CNG	Compressed Natural Gas
CTL	Coal to Liquid
DIW	Deutsches Institut für Wirtschaftsforschung
DME	Dimethylether
dm^3	Kubikdezimeter
EU	Europäische Union
EUCAR	European Council for Automotive R&D
FAME	Fettsäuremethylester
FFV	Flexi-Fuel-Vehicle
FME	Tierfettmethylester
FNR	Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe
FVV	Forschungsvereinigung Verbrennungskraftmaschinen
g/km	Gramm pro Kilometer
GTL	Gas to Liquid
HC	Hydrocarbons (Kohlenwasserstoffe)
H_2O	Wasser
KBA	Kraftfahrtbundesamt

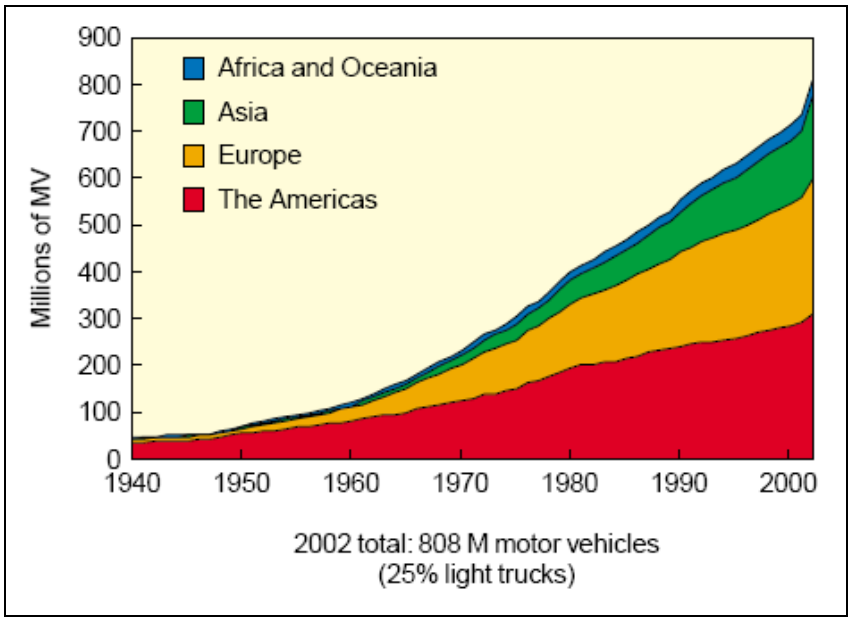
kg	Kilogramm
kW	Kilowatt
kWh/kg	Kilowattstunde pro Kilogramm
kWh/l	Kilowattstunde pro Liter
LH_2	Liquid Hydrogen
LNG	Liquefied Natural Gas
LPG	Liquefied Petroleum Gas
Mbpd	Million Barrels per Day
Mio.	Million
MPa	Megapascal
Mrd.	Milliarde
MV	Motor Vehicle
m^3	Kubikmeter
NO_x	Stickoxide
O_2	Sauerstoff
OPEC	Organization of Petroleum Exporting Countries
Pkw	Personenkraftwagen
PME	Palmölmethylester
RME	Rapsmethylester
SME	Sojaölmethylester
THG	Treibhausgas
TTW	Tank to Wheel
u.a.	und andere
VDA	Verband der Automobilindustrie
VDB	Verband deutscher Biokraftstoffindustrie
WBCSD	World Business Council for Sustainable Development
W/kg	Watt pro Kilogramm
W/l	Watt pro Liter
Wh/kg	Wattstunde pro Kilogramm
Wh/l	Wattstunde pro Liter
WTT	Well to Tank
WTW	Well to Wheel

1 Einleitung: Mobilität und Wohlstand

Die Erfindung des Rades (ca. 3200 v. Chr.) ermöglichte den Menschen nicht nur schwerere Lasten zu transportieren, sondern legte vielmehr den Grundstein für seine Mobilität. Die Dampfmaschine (1769) und die auf deren Grundlage entwickelte Lokomotive (1804) verursachten im späten 18. und im Laufe des 19. Jahrhunderts die industrielle Revolution. Die Erfindung des Automobils im Jahr 1886 und die erste Fernfahrt im Jahr 1888 von Pforzheim nach Mannheim waren der Ausgangspunkt für die mobile Gesellschaft heute.

Im 20. Jahrhundert wurde aus dem Automobil das vorherrschende Verkehrsmittel in den Industrieländern. Heutzutage ist es ein wichtiges Zeichen von Modernisierung und ökonomischem Fortschritt in den Schwellen- und Entwicklungsländern[1]. In der Abbildung 1 wird beispielhaft hierfür die Entwicklung des Fahrzeugbestandes weltweit nach verschiedenen Regionen aufgezeigt. Demnach hat sich der Bestand der privaten Kraftfahrzeuge seit 1970 mehr als verdreifacht und wird im Jahr 2003 auf etwa 600 Millionen Fahrzeuge beziffert[2].

Abbildung 1: Weltweite Entwicklung des Bestandes der Kraftfahrzeuge

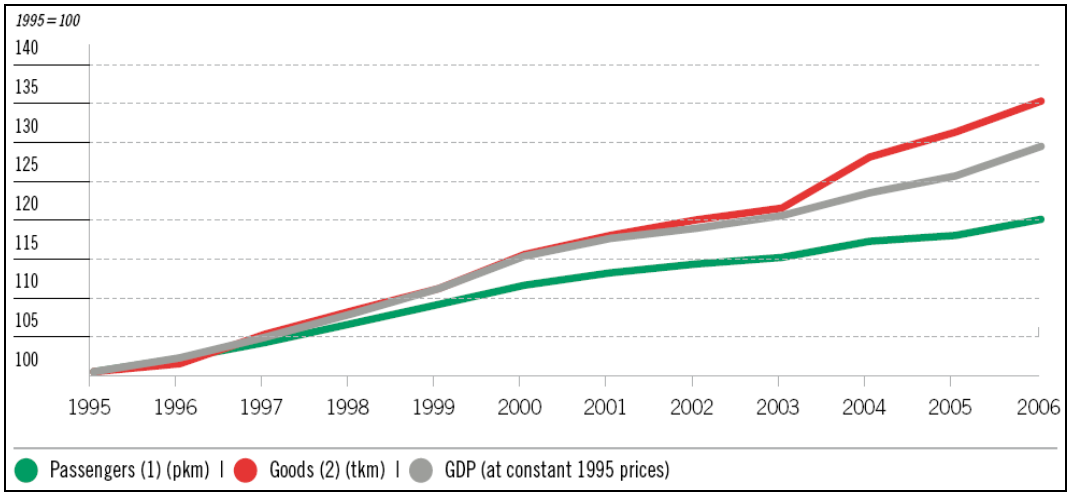


Quelle: IFP (2004), S. 2

[1] Vgl. Rammler (2003), S. 2
[2] Vgl. IFP (2004), S. 2

Die Mobilität bedeutet Bewegungsfreiheit für einzelne Personen, zudem ist ihre Gewährleistung ein bedeutender Faktor für das ökonomische Wachstum und den Beschäftigungsgrad[3]. Die Abbildung 2 stellt grafisch den Zusammenhang zwischen dem steigenden Bruttoinlandsprodukt und des zunehmenden Personen- und Güterverkehrs in der Europäischen Union dar. Das arbeitsteilige Wirtschaften und die Wertschöpfung aller Wirtschaftsbereiche werden durch die Mobilität von Gütern (wie Rohstoffe, Fertigprodukte) und Personen (wie Berufstätige, Verbraucher) gewährleistet, deshalb spielt in der modernen Volkswirtschaft der Verkehrssektor eine zentrale Rolle. Aus ökonomischer Sicht ist die individuelle Mobilität eine Voraussetzung für das wirtschaftliche Wachstum und den Wohlstand, zudem ermöglicht sie aus sozialer Sicht den Menschen die Teilnahme am gesellschaftlichen Leben[4]. Die preiswerte, uneingeschränkte, ausreichende und zugängliche individuelle Mobilität ist somit eine Voraussetzung auch für den zukünftigen Wohlstand einer Volkswirtschaft[5].

Abbildung 2: Zusammenhang zwischen Wirtschaftswachstum und Mobilität



Quelle: ACEA (2009), S. 35

In der vorliegenden Diplomarbeit werden alternative Kraftstoffe und Antriebe für Personenkraftwagen vorgestellt, welche die individuelle Mobilität in der Zukunft sichern sollen. Zunächst wird in Kapitel 2 die Notwendigkeit der Alternativen zu den heutigen Otto- und Dieselantrieben erläutert. Im darauffolgenden Kapitel werden die allgemeinen Anforderungen an die zukünftigen Kraftstoffe und Ant-

[3] Vgl. Kahmann, Lindenberg, Törkel (2006), S. 96
[4] Vgl. BMWi (2008), S. 4
[5] Vgl. Puls (2006), S. 8

riebe diskutiert. In den Kapiteln 4 und 5 werden die alternativen Kraftstoffe und Antriebe vorgestellt. Die Bewertung und die Gegenüberstellung der vorgestellten Alternativen erfolgt in Kapitel 6 nach zuvor festgelegten Bewertungskriterien.

Das Ziel dieser Diplomarbeit ist es, jedem Leser – ob Fachmann oder Laie – die Möglichkeit zu geben, eine Übersicht über die heute bereits entwickelten oder sich in der Entwicklung befindlichen alternativen Kraftstoffe und Antriebe zu bekommen. Die Bewertung und die Gegenüberstellung sollen zudem eine Beurteilung aufgrund ökonomischer und ökologischer Faktoren erlauben.

In erster Linie dient die Fachliteratur für die vorliegende Diplomarbeit als Informationsquelle. Da das Thema sehr aktuell ist und stets neue Erkenntnisse folgen, ist es unumgänglich, das Internet und Printmedien für weitere Recherchen einzusetzen. Bei der Wahl der Internetquellen wurde mit Sorgfalt auf die Seriosität und den wissenschaftlichen Hintergrund geachtet.

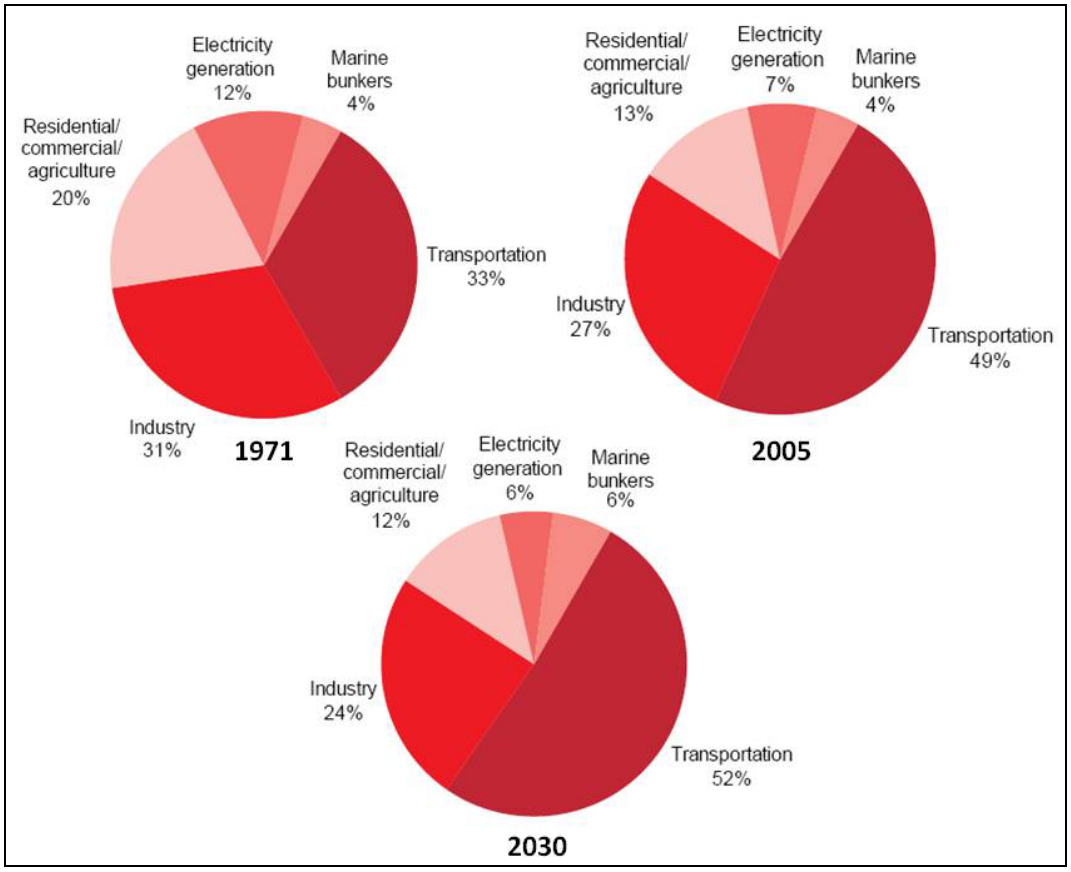
Im Folgenden werden die alternativen Kraftstoffe unter dem Begriff alternative Antriebe eingeschlossen. Unter konventionellen Antrieben sind Verbrennungsmotoren nach dem Otto- und Dieselverfahren mit dem Einsatz von Benzin- und Dieselkraftstoff zu verstehen.

2 Notwendigkeit alternativer Antriebe

2.1 Knappheit fossiler Energieträger

Das Erdöl ist weltweit der wichtigste Energieträger und für sämtliche Transportsysteme von großer Wichtigkeit[6]. Es wird für die Herstellung von Benzin- und Dieseltreibstoff, die in konventionellen Verbrennungsmotoren eingesetzt werden, benötigt. Eine Tonne Erdöl ergibt 330 Liter Benzin und 430 Liter Diesel[7]. Der Transportsektor war im Jahr 2005 mit 49 Prozent der größte Ölverbraucher und dessen Anteil wird voraussichtlich auf 52 Prozent im Jahr 2030 steigen, wie die Abbildung 3 veranschaulicht.

Abbildung 3: Verteilung des weltweiten Erdölverbrauchs nach Sektor

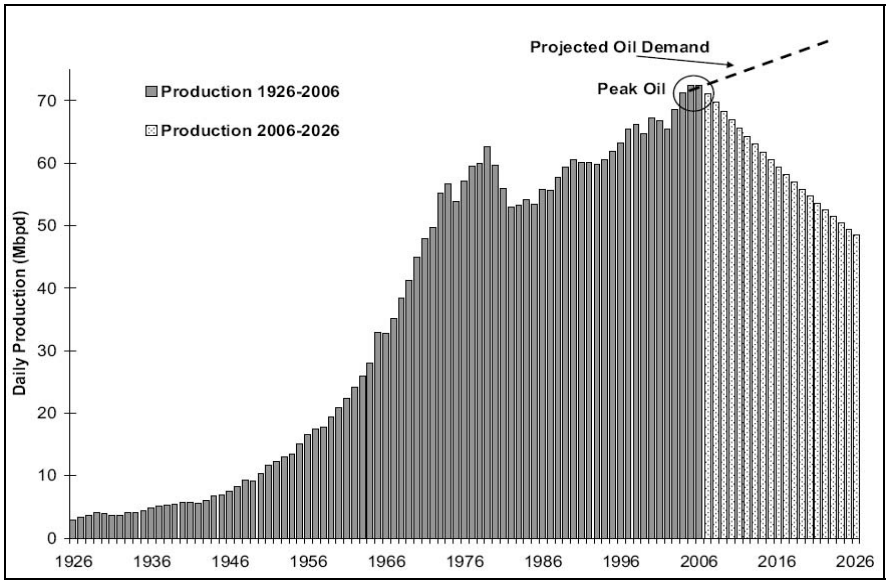


Quelle: OPEC (2008), S. 53

[6] Vgl. Schindler, Zittel (2008), S. 5
[7] Vgl. Total (2008), S. 10

Doch wie andere fossile Rohstoffe ist auch Erdöl endlich. Die globale statische Reichweite[8] wird heute mit 40 bis 42 Jahren[9] beziffert. Durch den technologischen Fortschritt nehmen die Reserven vom Erdöl tendenziell zu, dennoch darf man nicht außer Acht lassen, dass trotzdem dessen Ressourcen[10] endlich sind. Es ist weiterhin anzunehmen, dass das Ölfördermaximum im Jahr 2006 erreicht wurde[11], wie die Abbildung 4 zeigt. Nach Schindler und Zittel ist im Jahr 2030 mit einer Versorgungslücke durch den Rückgang der Ölförderung zu rechnen[12].

Abbildung 4: Weltweite Ölförderung zwischen 1926 und 2026



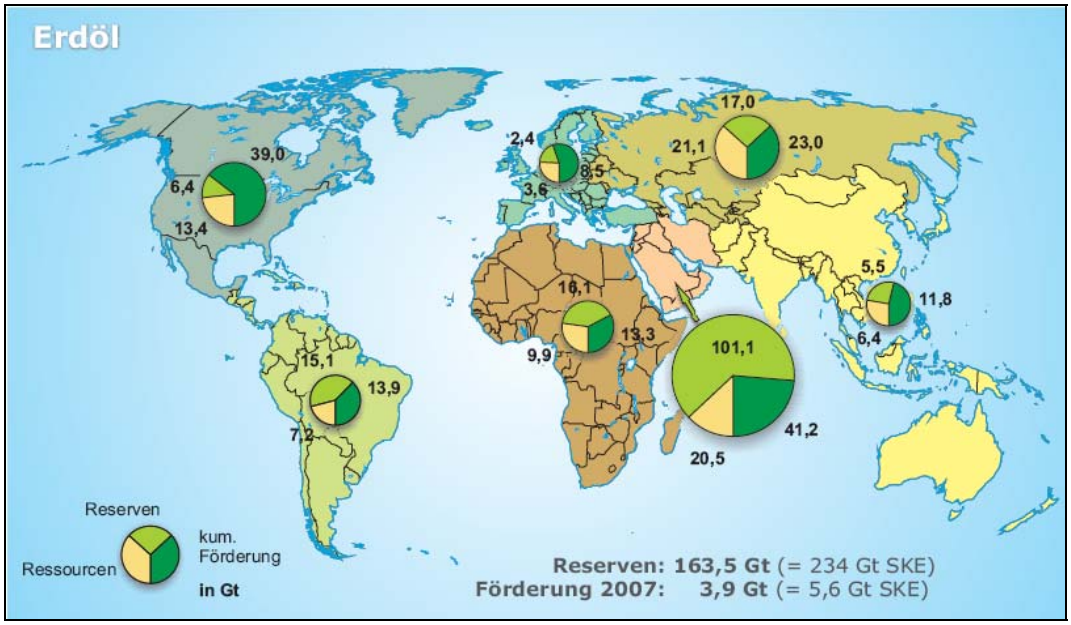
Quelle: Robelius (2007), S. 59

Die zunehmende Knappheit wird nicht allein durch die Endlichkeit dieses Rohstoffes verursacht. Einerseits gefährden politische Unruhen und Sicherheitsprobleme in den ölfördernden Ländern die Versorgungssicherheit, da sich beispielsweise ca. 62 Prozent der weltweiten Reserven im Nahen Osten befinden (Abbildung 5). Andererseits steigt der Erdölpreis durch wachsende Nachfrage und spekulative Märkte[13]. Es gilt also für die Zukunft, die Abhängigkeit der Mobilität von Erdöl zu verringern oder gänzlich zu vermeiden.

---

[8] Statische Reichweite zeigt das Verhältnis der derzeitig technisch und wirtschaftlich gewinnbaren Reserven eines Rohstoffes und dessen jährlichen Fördermenge.
[9] Vgl. BGR (2006), S. 13; BP (2009), S. 6
[10] Im Gegensatz zu Reserven, geben Ressourcen nachgewiesene, aber derzeit technisch und/oder wirtschaftlich nicht gewinnbare sowie nicht nachgewiesene, aber geologisch mögliche, künftig gewinnbare Mengen an Energierohstoffen an.
[11] Vgl. Schindler, Zittel (2008), S. 9
[12] Vgl. Schindler, Zittel (2008), S. 14
[13] Vgl. Gross (2008), S. 3

Abbildung 5: Gesamtpotenzial konventionelles Erdöl im Jahr 2007



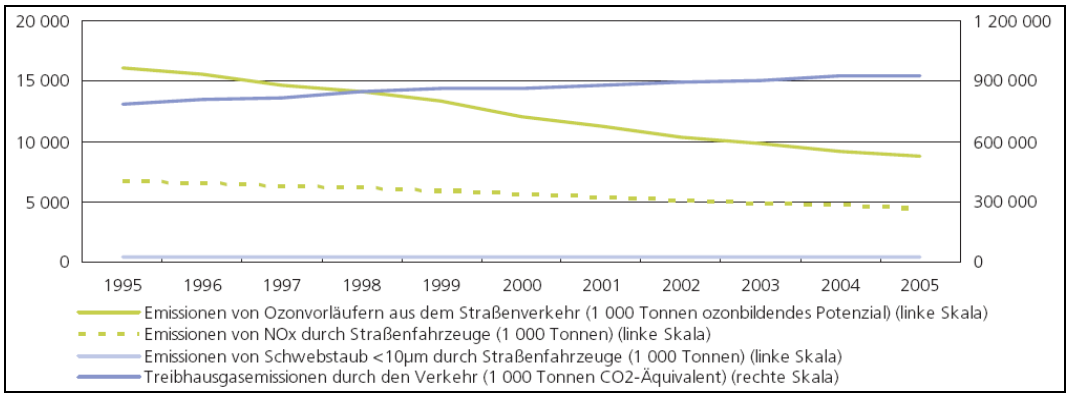
Quelle: BGR (2007), S. 19

2.2 Emissionen von Klimagasen

Bei der Verbrennung fossiler Kraftstoffe entstehen umweltschädliche Gase, die den Treibhauseffekt der Erde beeinflussen und somit das Klima verändern. Jedes Fahrzeug stößt direkt durchschnittlich 165 g/km bei Dieselkraftstoff und 185 g/km bis 195 g/km bei Benzinkraftstoff[14] an Menge von CO_{2eq}-Gasen[15] aus. Man bedenke, dass obwohl der durchschnittliche Kraftstoffverbrauch und die CO_{2eq}-Emissionen pro Fahrzeug seit 1995 um 14 Prozent gesunken sind[16], das der absolute Wert der Treibhausgasemissionen in Zusammenhang mit Fahrzeugen im selben Zeitraum in den EU-27-Staaten gestiegen ist (Abbildung 6; blaue Linie, rechte Skala). Auch ist der Anteil des Verkehrsektors an den gesamten Treibhausgasemissionen von 16 auf 21 Prozent angewachsen, siehe hierzu den Vergleich der CO_{2eq}-Emissionen der EU-15-Staaten in den Jahren 1990 und 2005 in der Abbildung 7.

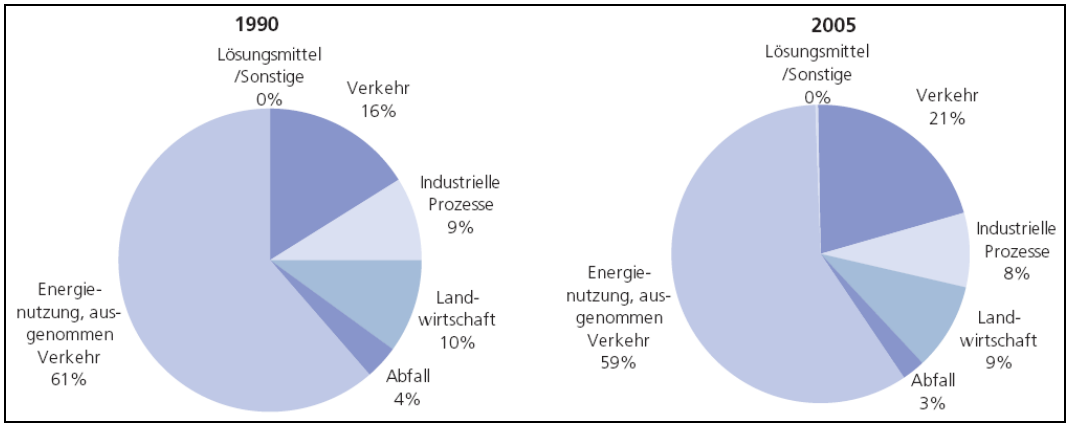
[14] Vgl. Gross (2008), S. 15
[15] Mit der Maßeinheit CO_{2eq} kann das globale Erwärmungspotenzial jedes Treibhausgases gemessen und ausgedrückt werden, dabei entspricht es der Menge an CO_2, das dasselbe Erwärmungspotenzial hätte. Gross (2008), S. 15
[16] Vgl. EUCAR (2008a), S. 6

Abbildung 6: Emissionen im Zusammenhang mit Straßenfahrzeugen in EU-27



Quelle: EUROSTAT (2008), S. 409

Abbildung 7: Treibhausgasemissionen nach Sektor in EU-15



Quelle: EUROSTAT (2008), S. 403

Die klimatischen Veränderungen, die durch die Treibhausgase hervorgerufen werden, verursachen zudem hohe Kosten für die Volkswirtschaften. Die Europäische Kommission schätzt den Anstieg der Vermeidungskosten bei einem Temperaturanstieg um 2 °C von 15 Euro pro Tonne CO_2 im Jahr 2010 auf 65 Euro pro Tonne im Jahr 2030[17]. Das Ziel ist es, die Umwelt zu schützen und den Ausstoß von umweltschädlichen Gasen pro Fahrzeug und insgesamt zu verringern.

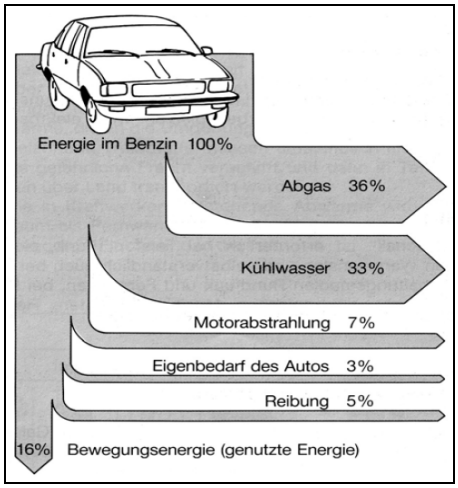
2.3 Wirkungsgrad der Verbrennungsmotoren

Das Funktionsprinzip konventioneller Verbrennungsmotoren beruht auf der Verbrennung von Benzin- oder Dieselkraftstoff. Dabei dehnt sich das Kraftstoff-Luft-Gemisch aus und erzeugt mechanische Bewegungsenergie. Diese Energieum-

[17] Vgl. Maibach u.a. (2008), S. 79

wandlung ist aber ein großer Nachteil dieses Prinzips, da hier die meiste Energie als Wärmeenergie im Fahrzeug ungenutzt bleibt. Die Umwandlungsverluste werden deutlich in der Abbildung 8 aufgezeigt. So beträgt der Anteil der im Benzin vorhandenen Energie, welcher in Bewegungsenergie umgewandelt wird, nur 16 Prozent[18].

Abbildung 8: Umwandlungsverluste in einem Personenwagen



Quelle: Landesbildungsserver Baden-Württemberg (URL: http://www.schule-bw.de/ /unterricht/faecher/nwt/unterrichtseinheiten/einheiten/rad1_pics/Verbrennungsmotor.pdf)

Betrachtet man zusätzlich die gesamte Kette von der Bereitstellung des Energieträgers bis zur Umwandlung in Energie, ist das Ergebnis noch ernüchternder. Als Beispiel sei genannt, dass von 100 Prozent der Energie des Erdöls über den Raffinerieprozess zu Benzin bis hin zur Bewegung des Fahrzeuges die verketteten Prozesse etwa folgende Anteile in Anspruch nehmen[19]:

- 10% Benzinherstellung aus Erdöl[20]
- 10% Auswirkungen der Nutzlastverhältnisse
- 2-3% Verlust der Getriebewirkungsgrade
- 70% Wirkungsgrad des Motors, Kühlung und Abgasenergie

Von der Energie, die im Erdöl steckt, werden letztendlich nur 7 bis 8 Prozent in Bewegungsenergie in einem Fahrzeug umgewandelt. Bedenkt man dabei die Endlichkeit des Rohstoffs Öl und umweltbelastende Emissionen, wie zuvor behandelt, ist auch dies ein Grund für die Suche nach einer Alternative.

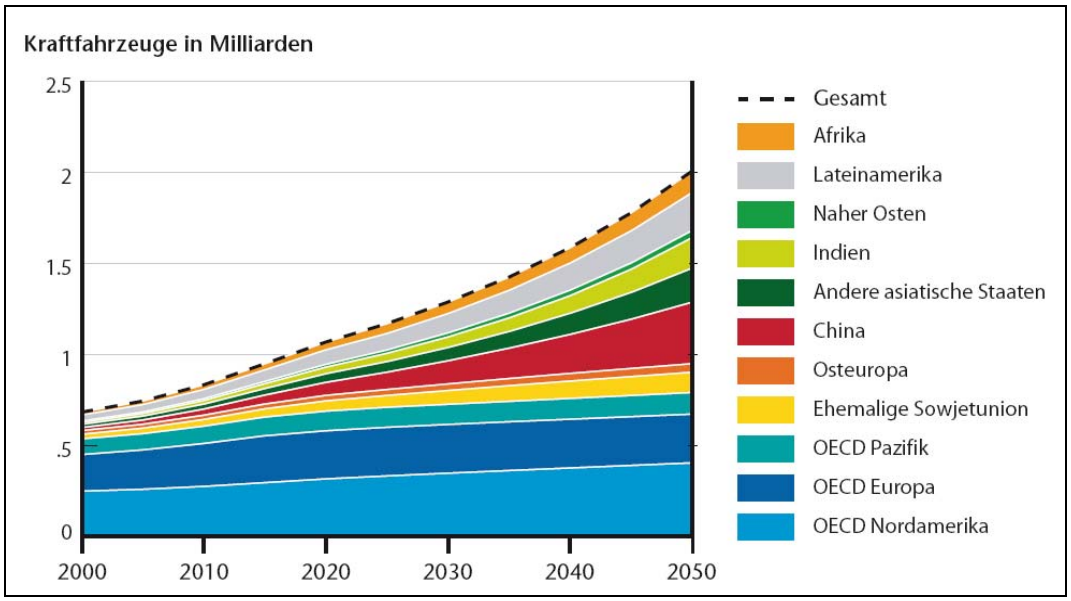
---

[18] Vgl. EUCAR (2008b), S. 22
[19] Vgl. Stan (2008), S. 17f
[20] Einschließlich Erdölerkundung und -förderung, Ferntransport, Raffinerieprozess, Verteilung in der Infrastruktur; Stan (2008), S. 17

2.4 Zunahme des Verkehrs

Die Globalisierung erfordert das arbeitsteilige Wirtschaften und fördert somit den Güter- und Personentransport. Dieser Güter- und Personenverkehr führt jedoch zu erheblichen Umweltbelastungen, die durch den Verbrauch von fossilen Energieträgern, durch Luft- und Lärmemissionen und Inanspruchnahme von Naturflächen entstehen[21]. Wie bereits in dem einleitenden Kapitel beschrieben, erweitert die Mobilität allerdings die persönlichen Freiheiten und ist für das Funktionieren einer globalen Wirtschaft und internationalen Wettbewerb von Bedeutung. Daher muss das Ziel verfolgt werden, das Wirtschaftswachstum von der Zunahme des persönlichen Verkehrs und hierdurch verursachten Umweltbelastungen zu entkoppeln. Laut der World Business Council for Sustainable Development[22] wird der globale Kraftfahrzeugbestand, somit auch der persönliche Verkehr, weiterhin wachsen und im Jahr 2050 zwei Milliarden Personenwagen erreichen (Abbildung 9). Um den damit verbundenen Umweltschäden entgegenzuwirken, müssen umwelt- und ressourcenschonende Antriebskonzepte für Automobile entwickelt und verbreitet werden.

Abbildung 9: Hochgerechneter Gesamtbestand an Personenwagen nach Regionen



Quelle: WBCSD (2004), S. 11

[21] Vgl. DESTATIS (2007), S. 32

[22] World Business Council for Sustainable Development (WBCSD) ist eine von Unternehmensvorständen geführte Organisation, die sich mit dem Thema „Wirtschaft und Nachhaltige Entwicklung“ beschäftigt. URL für weitere Informationen: http://www.wbcsd.org/

3 Anforderungen an alternative Antriebe

Jedes neue Konzept für einen alternativen Kraftstoff oder Antrieb stößt auf große Herausforderungen, denn diese Alternativen müssen sich im Wettbewerb gegen die konventionellen Antriebe behaupten[23]. Dabei spielt einerseits auf der mikroökonomischen Ebene der Autokäufer selbst eine wichtige Rolle. Die Kriterien, wie Komfort, Sicherheit, Fahrleistungen, Anschaffungs- und Unterhaltskosten, die zu seiner Kaufentscheidung beitragen, sind auch für den Fahrzeughersteller von großer Bedeutung, da der Absatz über den wirtschaftlichen Erfolg eines Konzepts bestimmt[24]. Andererseits sind die ökologischen und ökonomischen Faktoren auf der makroökonomischen Ebene für die Zukunftsfähigkeit von alternativen Kraftstoffen und Antrieben verantwortlich. Hier ist die Well-to-Wheel Betrachtungsweise heranzuziehen, um die Effizienz über den gesamten Weg vom Primärenergieträger bis zur Bewegung des Rades zu analysieren.

Die Anforderung an einen alternativen Antrieb ist es, die Umweltverträglichkeit mit möglichst geringen Kosten zu erreichen. Erstens müssen aus ökologischer Sicht die Schadstoff- und Geräuschemissionen, sowie der Energieverbrauch vermindert oder vermieden werden. Zweitens sollen aus der ökonomischen Sicht die Kosten für die Verfügbarkeit, Versorgungssicherheit und die Speicherung der Energieträger im Rahmen bleiben. Unnötige technische Komplexität und gravierende Umstellungen der Infrastruktur und der Servicemöglichkeiten würden die ökonomischen Belastungen weiter in die Höhe treiben.

Der Endverbraucher sollte nicht durch die alternativen Antriebe auf Sicherheit und Komfort verzichten müssen. Eine möglichst zeitlich und räumlich uneingeschränkte Nutzung muss gewährleistet sein. Das Masse-Leistungsverhältnis bzw. Leistungs-Volumen-Verhältnis und der Drehmomentverlauf sind weitere Kriterien für den zukünftigen Erfolg[25].

---

[23] Vgl. Puls (2006), S. 11f
[24] Vgl. Puls (2006), S. 12
[25] Vgl. Stan (2008), S. 22

4 Alternative Kraftstoffe

Im folgenden Kapitel werden die alternativen Kraftstoffe vorgestellt. Hierbei spielen die ökonomischen und die ökologischen Faktoren eine zentrale Rolle. Soweit sich die jeweiligen Kraftstoffe bereits im Einsatz befinden, werden zusätzlich die Alltagstauglichkeit und die Wirtschaftlichkeit aus der Sicht des Autofahrers geprüft.

4.1 Alternative fossile Kraftstoffe

4.1.1 Erdgas

Das Erdgas ist ein natürliches brennbares Gas, dessen Vorkommen sich häufig in den gleichen Gebieten wie Erdöl befindet. Da es ein endlicher fossiler Rohstoff ist, stellt es nur kurz- bis mittelfristig eine Alternative zum Erdöl dar. Die statische Reichweite vom Erdgas beträgt etwa 60 bis 70 Jahre[26]. Oftmals wird das Erdgas in großen Mengen auf den Erdöl-Bohrfeldern verbrannt, bleibt somit ungenutzt und verursacht dabei zusätzlich CO_2-Emissionen.

Das Erdgas besteht aus 85 bis 95 Prozent aus Methan[27] und enthält auch größere Anteile von Ethan oder Propan, Schwefelwasserstoff und bis zu 9 Prozent Kohlendioxid[28]. Das Erdgas mit niedrigen Methananteilen wird vor der Verwendung gereinigt, wobei bereits während des Reinigungsprozesses CO_2 an die Luft abgegeben wird.

Die Umrüstung von Ottomotoren von Benzin- auf Erdgasbetrieb ist aufgrund der ähnlichen Werte von Heizwert[29] und Luftbedarf weitgehend unproblematisch[30]. Im Vergleich zu konventionellen Fahrzeugen sind lediglich spezielle Speicher- und Einspritzsysteme erforderlich. Durch die hohe Oktanzahl von ca. 120 (91-99 bei Benzinkraftstoff) ist Erdgas ideal für den Einsatz in fremdgezündeten Ver-

[26] Vgl. BGR (2006), S. 13; BP (2009), S. 22; Stan (2008), S. 12
[27] Vgl. Stan (2008), S. 175
[28] Vgl. Puls (2006), S. 30
[29] Heizwert ist die Wärme die durch das Verbrennen eines Kraftstoffes entsteht. Je höher der Heizwert ist, desto weniger Kraftstoff wird für dieselbe Menge Energie benötigt. Vgl. Stan (2008), S. 171
[30] Vgl. Stan (2008), S. 175

brennungsmotoren (Ottomotoren). Beim Einsatz in den Automobilen stellt aber die aufwendige Speicherung von Erdgas den größten Nachteil dar.

Die heute übliche Speicherform für den Einsatz in Kraftfahrzeugen ist die gasförmige Speicherung unter Druck, genannt CNG (Compressed Natural Gas). Das Erdgas wird dabei unter 20 MPa Druck[31] bei dennoch geringer Dichte gespeichert. Neben der gasförmigen ist auch die Speicherung in flüssiger Form möglich. Bei der LNG (Liquefied Natural Gas) genannten Technik wird das Erdgas bei -150 °C und 0,1 MPa verflüssigt. Hierbei steigt einerseits die Dichte um das Dreifache gegenüber CNG, andererseits nimmt der technische Aufwand der Herstellung und der Handhabung deutlich zu[32]. Angesichts der höheren Kosten spielt LNG derzeit nur im Ferntransport und nicht bei dem Einsatz in einem Fahrzeug eine Rolle[33].

Das zukunftsträchtige Verfahren unter der Bezeichnung ANG (Adsorbed Natural Gas) befindet sich zurzeit im Entwicklungsstadium und verspricht eine höhere Speichermenge bei Raumtemperatur und niedrigerem Druck (3-7 MPa) als CNG[34]. Das Erdgas wird bei dieser Technik in einem Adsorptionsspeicher[35], einer Aktivkohlematrix, gelagert. Das ANG erlaubt durch den niedrigeren Druck einen geringeren technischen Aufwand und die Senkung der damit verbundenen Kosten im Vergleich zu CNG.

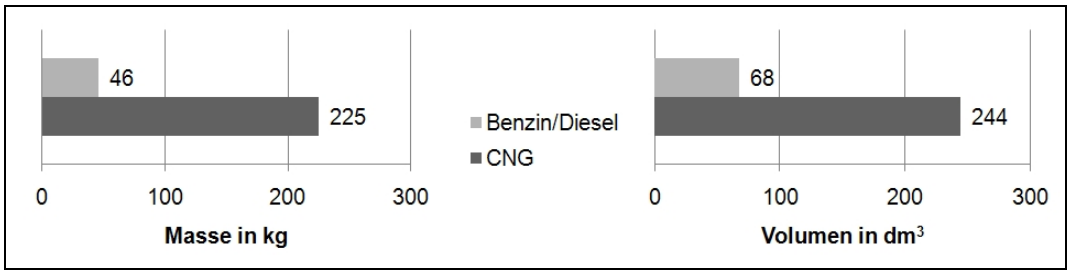
Wie bereits im vorangegangenen Abschnitt beschrieben, wird bei dem Verfahren Compressed Natural Gas (CNG) das Erdgas unter Druck von 20 MPa gespeichert. Durch die dennoch geringe Dichte nehmen die Masse und das Volumen des erforderlichen Speichers zu[36]. Folglich benötigt man mit CNG für 55 Liter benzinäquivalente Energiemenge einen Drucktank mit 225 kg Gewicht und 244 dm^3 Volumen (zum Vergleich: Benzin/Diesel benötigt 46 kg und 68 dm^3, siehe Abbil-

[31] Zum Vergleich: der normale atmosphärische Druck liegt bei 0,1 MPa.
[32] Vgl. Stan (2008), S. 176
[33] Vgl. Puls (2006) S. 32
[34] Vgl. Energtek (URL: http://www.energtek.com/solutions/adsorbed_natural_gas_technology/application)
[35] Als Adsorption bezeichnet man die Anreicherung von Stoffen mit Gasen oder Flüssigkeiten.
[36] Vgl. Stan (2008), S. 176

dung 10)[37]. Dies führt zu einem höheren Gewicht der CNG-betriebenen Fahrzeuge.

Für den Autofahrer ist der Umstieg auf den CNG-Betrieb finanziell interessant. So liegt der Tankstellenpreis für ein Kilogramm CNG im Juli 2009 bei 1,043 Euro[38]. Um den Preis mit dem von Benzin und Diesel vergleichbar zu machen ist eine Umrechnung notwendig. Da ein Kilogramm Erdgas einen Energiegehalt von ca. 13,0 kWh/kg und ein Liter Benzin 8,88 kWh/l bzw. ein Liter Diesel 9,84 kWh/l aufweisen[39], entspricht ein Kilogramm CNG etwa 1,5 Litern Benzin bzw. 1,3 Litern Diesel. Der reale Preis für Erdgas bezogen auf den Energiegehalt liegt somit bei 0,70 Euro im Vergleich zum Benzinpreis und bei 0,80 Euro verglichen mit Dieselpreis. Dieser Preisvorteil beruht nicht zuletzt auf dem verminderten Mineralsteuersatz, der bis Ende 2018 festgeschrieben wurde.

Abbildung 10: Vergleich der Masse und Volumina von CNG und Benzin/Diesel



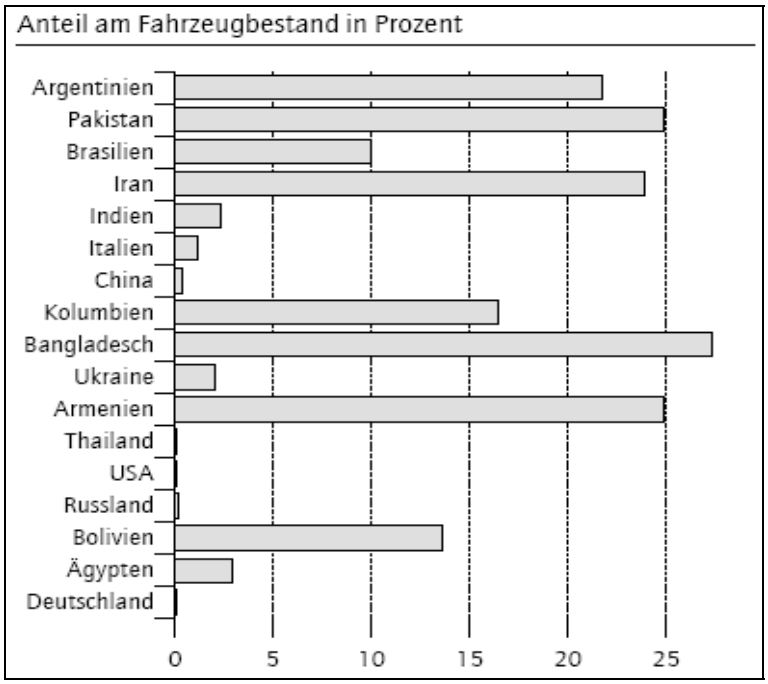
Quelle: Stan (2008), S. 21

In der Vergangenheit fehlte es den erdgasbetriebenen Fahrzeugen an der Akzeptanz der deutschen Kunden vor allem in Bezug auf die begrenzte Reichweite von rund 370 km in Verbindung mit dem dünnen Tankstellennetz[40]. Weltweit hingegen stieg die Zahl dieser Fahrzeuge zwischen 2000 und 2007 von 1,2 Millionen auf etwa 7 Millionen, damit erreichte sie einen Anteil von 1,2 Prozent am globalen Fahrzeugbestand. In Deutschland liegt die Zahl der Neuzulassungen jährlich konstant bei etwas über 11.000 Stück. Der deutsche Bestand der erdgasbetriebener Fahrzeuge verdoppelte sich zwar fast zwischen 2006 und 2009, innerhalb von vier

[37] Vgl. Stan (2008), S. 21
[38] Tankstellenpreis wurde mittels der Kraftstoffpreis Schnellsuche von ADAC e. V. ermittelt. Durchschnittlicher Preis von drei Tankstellen in Stuttgart, Stand 22.07.09, ADAC (URL: http://www.adac.de/Auto_Motorrad/Tanken/)
[39] Vgl. ADAC (URL: http://www.adac.de/Auto_Motorrad/Tanken/Alternative_Kraftstoffe/Erdgas/wirtschaftlichkeit); MTC (URL: http://www.erdgasfahrzeuge.de/preis-vergleich)
[40] Vgl. VDA (2005), S. 9

Jahren wuchs die Zahl von 30.554 auf 60.744, dessen Anteil beträgt aber lediglich 0,15 Prozent am Gesamtbestand[41]. Die Abbildung 11 stellt einen Vergleich der anteiligen Fahrzeugbestände von ausgewählten Ländern dar. Besonders in Südamerika und Asien ist der Bestand anteilig relativ hoch und entwickelt sich stark positiv (Abbildung 12). Die Zahl der CNG-Fahrzeuge stieg im Jahr 2008 weltweit auf über 9 Millionen[42].

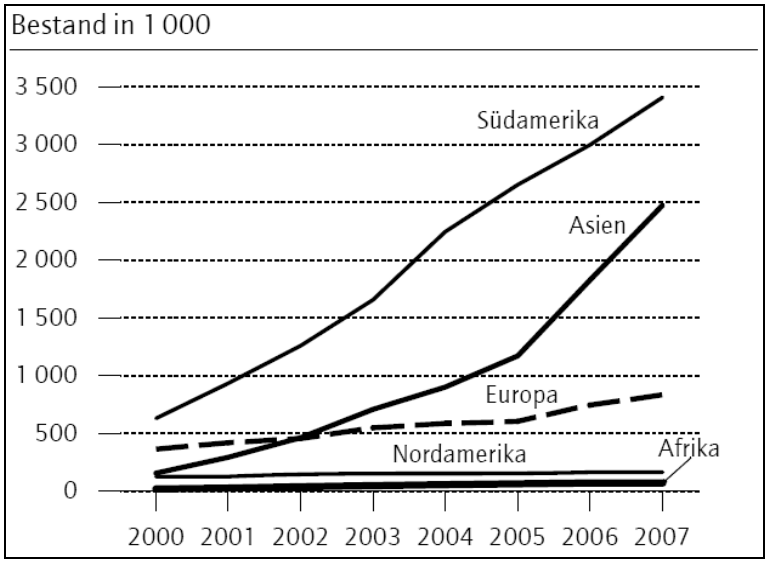
Abbildung 11: Verbreitung von Erdgasfahrzeugen 2007



Quelle: DIW (2008), S. 792

[41] Vgl. KBA (2009a), S. 23; KBA (2009b), S. 7
[42] Vgl. DIW (2008), S. 791f

Abbildung 12: Erdgasfahrzeug-Bestand nach Regionen 2000-2007

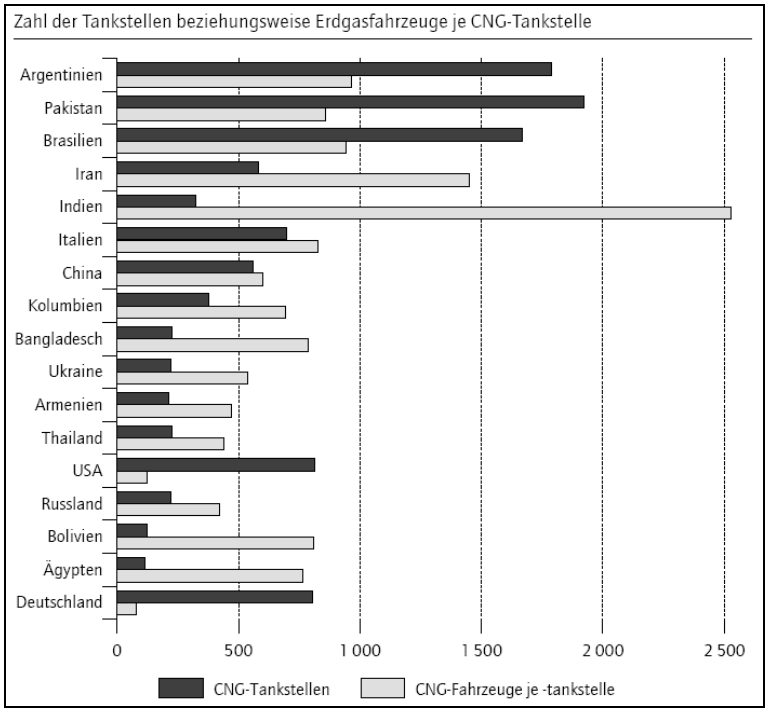


Quelle: DIW (2008), S. 791

Die Reichweiten im CNG-Betrieb der heute ab Werk verfügbaren erdgasbetriebenen Fahrzeuge sind zwar nicht deutlich gewachsen, aber die Anzahl der Erdgastankstellen ist von etwa 50 im Jahr 1998 auf etwa 850 Stationen heute deutschlandweit spürbar angestiegen[43]. Außerdem ist der bivalente Betrieb möglich, der sowohl den Antrieb mit Erdgas als auch mit Ottokraftstoff erlaubt. Dies erhöht die Reichweite und die Alltagstauglichkeit enorm. Die Abbildung 13 verdeutlicht eine Gegenüberstellung der Anzahl der CNG-Tankstellen und der CNG-Fahrzeugdichte in ausgewählten Ländern.

[43] Vgl. VDA (2005), S. 9; ADAC (URL: http://www.adac.de/Auto_Motorrad/Tanken/Alternative_Kraftstoffe/Erdgas/tanken/)

Abbildung 13: CNG-Tankstellen und -fahrzeugdichte in ausgewählten Ländern 2007



Quelle: DIW (2008), S. 793

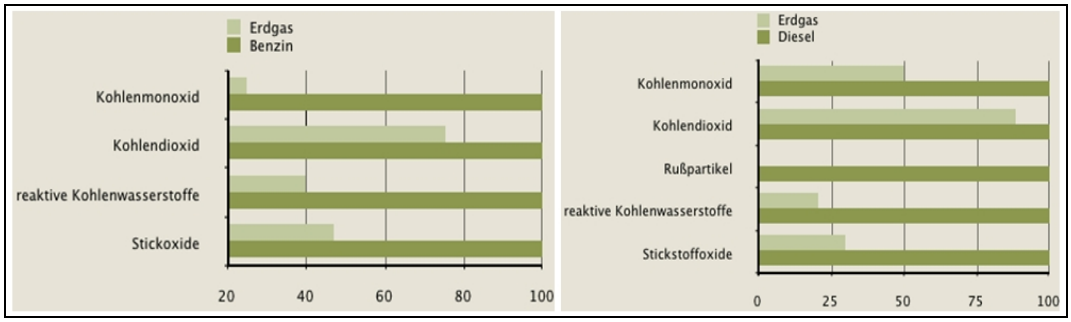
Der Einbau einer Erdgasanlage ist je nach Fahrzeug und Anlagentyp mit einem Kostenaufwand von 2.500 bis 4.500 Euro verbunden[44]. Die Amortisationsdauer für den Mehraufwand ist dabei von der jährlichen Laufleistung und dem Kraftstoffverbrauch abhängig. Es ist anzumerken, dass der Wirkungsgrad von CNG-betriebenen Motoren unter dem der konventionellen Motoren liegt. Bei monovalenten[45] Lösungen beträgt der Mehrverbrauch an Primärenergie bis zu 5 Prozent, bei Bivalenten sogar bis zu 20 Prozent. Dieser Nachteil kann aber durch die Weiterentwicklung von Erdgasmotoren verringert werden[46].

Aus ökologischer Sicht besitzt Erdgas die niedrigsten direkten CO_2-Emissionen verglichen mit den konventionellen Kraftstoffen, wie die Abbildung 14 zeigt. Vor allem der geringe Ausstoß von Stickoxiden (NO_x) und Feinstaub spricht für den Einsatz von Erdgas[47]. Ein CNG-betriebener Verbrennungsmotor ist leiser, was zu der Senkung der Lärmemissionen beiträgt. In der Well-to-Wheel Betrachtungs-

[44] Vgl. ADAC (URL: http://www.adac.de/Auto_Motorrad/Tanken/Alternative_Kraftstoffe/Erdgas/fahrzeugangebot/)
[45] Monovalente Motoren sind auf die Erdgasverbrennung ausgerichtet und arbeiten nur im Notfall mit Benzin.
[46] Vgl. Puls (2006), S. 35
[47] Vgl. DIW (2008), S. 788

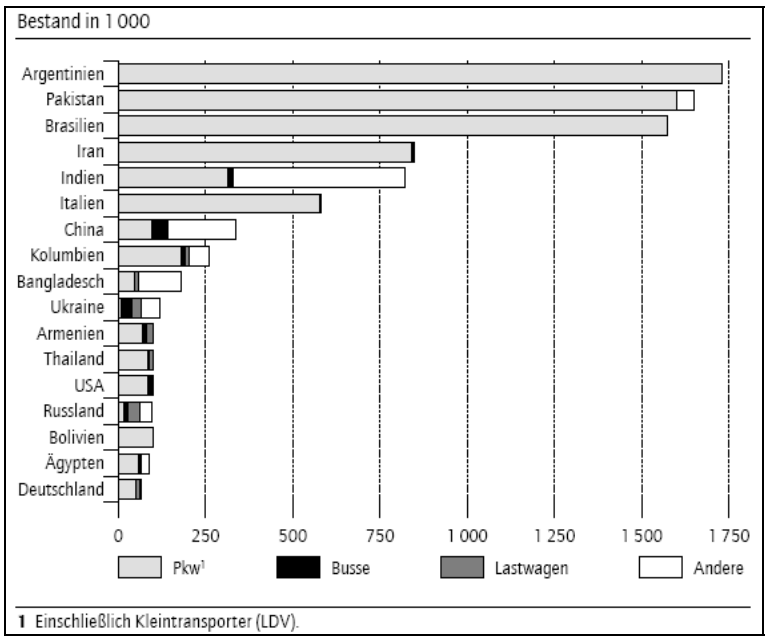
weise relativieren sich diese Vorteile, da besonders durch den Transport und den Energieaufwand für die Verdichtung des Erdgases die Schadstoffemissionen ansteigen. Besonders mittel- bis langfristig, sobald die Nachfrage nach Erdgas nicht mehr aus Europa befriedigt werden kann und dieses aus der Russischen Föderation geliefert werden muss, werden die bereits hohen indirekten CO_2-Emissionen weiter zunehmen. Dennoch lohnt sich der Einsatz von CNG besonders im Falle kommunaler Fahrzeuge wie Busse oder Müllfahrzeuge durch die geringeren lokalen Schadstoffemissionen als die von Dieselkraftstoff[48]. Derzeit wird das Erdgas in den meisten Fällen in Personenkraftwagen verwendet (Abbildung 15).

Abbildung 14: Gegenüberstellung der Schadstoffemissionen von Erdgas zu Benzin/Diesel



Quelle: MCT (URL: http://www.erdgasfahrzeuge.de/fakten-und-gesetze.html)

Abbildung 15: Erdgasfahrzeuge nach Fahrzeugtyp 2008



[48] Vgl. Puls (2006), S. 32-39

Quelle: DIW (2008), S. 791

Als ökonomischer Faktor ist einerseits die Minderung der Importabhängigkeit von Erdöl als positiv zu verzeichnen. So haben besonders Länder, die in der Vergangenheit Zahlungsschwierigkeiten aufwiesen oder Länder, die beabsichtigten, ihre Ölexportquote zu steigern, einen hohen Anteil an erdgasbetriebenen gen[49]. Andererseits ist negativ zu vermerken, dass der Aufbau marktwirtschaftlicher Konkurrenz zwischen Erdöl und Erdgas unmöglich ist, da der Preis beider Rohstoffe gekoppelt ist. Zusätzlich verursacht der Einsatz von CNG als Treibstoff hoher Investitions- und Betriebskosten für die Speicherung und die Verdichtung an der Tankstelle, besonders dann wenn sich diese weit von dem Pipelinenetz befindet[50].

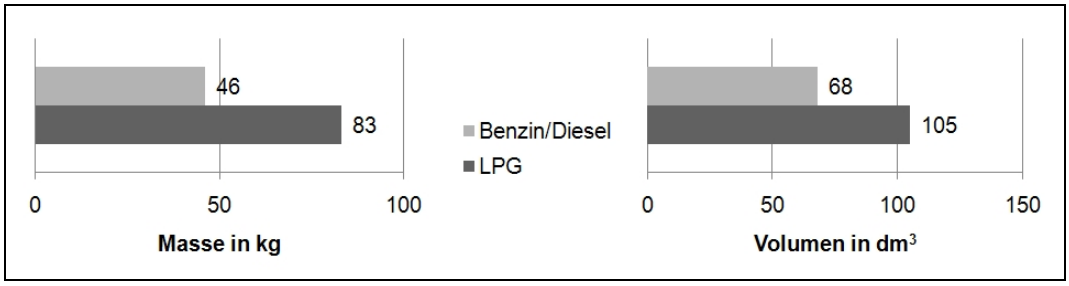
4.1.2 Autogas

Das Autogas, auch LPG (Liquefied Petroleum Gas) genannt, ist ein Gasgemisch aus Propan und Butan. Es entsteht als Nebenprodukt bei dem Raffinerieprozess des Erdöls und beim Erdgasaufbereitungssprozess[51]. Das Autogas ist also durch die Knappheit von Erdöl und Erdgas in der Verfügbarkeit beschränkt. Die Eigenschaften, wie Heizwert, Luftbedarf und Oktanzahl von LPG unterscheiden sich kaum von denen des Benzins. Das Autogas wird bei 1 MPa Druck in der flüssigen Form gespeichert. Dies führt im Vergleich mit Erdgas zu einem günstigeren Tankgewicht und –volumen. Für 55 Liter benzinäquivalenter Energiemenge wird ein Tank von 83 kg und 105 dm^3 benötigt (Abbildung 16). Gegenüber einem erdgasbetriebenen Fahrzeug ist beim gleichen Tankinhalt eine bis zu dreifache Reichweite erzielbar[52].

---

[49] Vgl. DIW (2008), S. 792
[50] Vgl. Puls (2006), S. 37f
[51] Vgl. DIW (2008), S. 788; Stan (2008), S. 186
[52] Vgl. ADAC (URL: http://www.adac.de/Auto_Motorrad/Tanken/Alternative_Kraftstoffe/Autogas/technik_umwelg/)

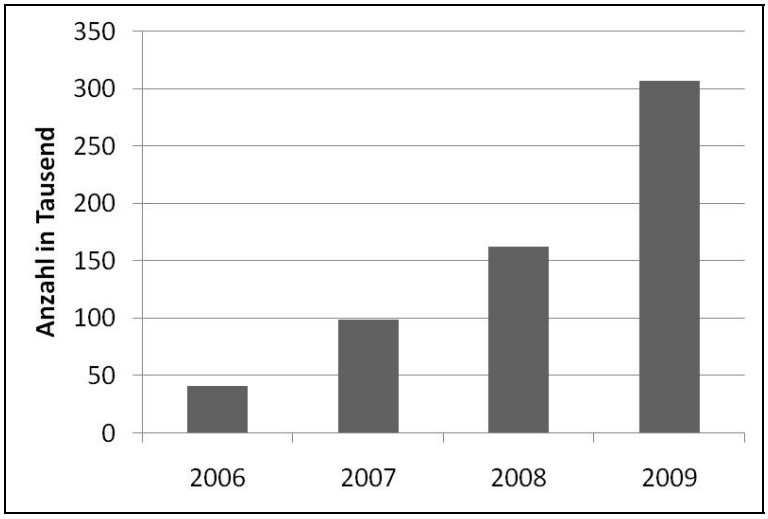
Abbildung 16: Vergleich der Masse und Volumina von LPG und Benzin/Diesel



Quelle: Stan (2008), S. 21

Aus der Sicht des Autofahrers ist der geringe Literpreis von 0,67 Euro im Schnitt interessant. Wie auch Erdgas profitiert Autogas in Deutschland von der steuerlichen Begünstigung bis Ende 2018. Man bedenke aber die notwendigen Umrüstkosten von 1.800 bis 3.500 Euro, beziehungsweise die Mehrkosten für ein Neufahrzeug von bis zu 2.800 Euro[53]. Trotz des Mehraufwandes vervielfachte sich der Bestand autogasbetriebener Pkw in Deutschland zwischen 2006 und 2009 von etwa 40.000 auf 306.000 Fahrzeuge (Abbildung 17). In Europa werden aktuell über 5,5 Mio. solcher Fahrzeuge gezählt. Auch ist das Tankstellennetz mit fast 5.000 Stationen dichter als das für CNG[54].

Abbildung 17: Autogasfahrzeug-Bestand in Deutschland 2006-2009



Quelle: KBA (2009a), S. 7

[53] Vgl. ADAC (URL: http://www.adac.de/Auto_Motorrad/Tanken/Alternative_Kraftstoffe/Autogas/wirtschaftlichkeit/)
[54] Vgl. Deutscher Verband Flüssiggas (URL: http://www.autogastanken.de/de/tanken/)

Aus Umweltschutzgründen sprechen die um 10 Prozent geringeren CO_2-Emissionen verglichen mit Benzin für Autogas. Diese sind jedoch um 2 Prozent höher, als die vom Diesel und 12 Prozent höher, verglichen mit denen von Erdgas. Die Emissionen von CO, HC und NO_x sind den von Benzin nahe[55]. Zusätzlich zu den geringen Abgasvorteilen kommt ein Leistungsverlust von ungefähr 5 Prozent eines LPG-betriebenen Motors gegenüber der Leistung im Benzinbetrieb[56] dazu.

4.1.3 Gas to Liquid (GTL)

Der Kraftstoff Gas to Liquid (GTL) ist ein synthetischer Kraftstoff auf Basis von fossilem Erdgas. Beim Herstellungsprozess wird zunächst bei hoher Temperatur und hohem Druck ein Synthesegas aus Erdgas erzeugt. Das Synthesegas wird anschließend chemisch durch Fischer-Tropsch-Synthese[57] in ein synthetisches Rohöl umgewandelt, woraus dann in einem weiteren Prozess der GTL-Kraftstoff hergestellt wird[58]. Er ist nahezu geruchlos, farblos, schwefelfrei und enthält keine Aromaten[59].

Aufgrund der synthetischen Herstellung und der Möglichkeit der Gestaltung der Eigenschaften weist GTL ein sehr gutes Verbrennungsverhalten und auch niedrige Schadstoffemissionen auf[60]. Vorteilhaft im Vergleich zu Dieselkraftstoff sind die geringeren NO_x- und Partikelemissionen[61]. Der GTL-Kraftstoff ist in Dieselfahrzeugen ohne eine Umrüstung einsetzbar und wird bereits als Beimischung zu Dieselkraftstoff in Europa und Asien verwendet. In Reinform steht GTL derzeit dem Autofahrer nicht zur Verfügung[62].

Da GTL ein flüssiger Kraftstoff ist, bedarf es keine Investitionen in die Bereitstellungsinfrastruktur. Aufgrund des Erdgaspreises ist der Betrieb von GTL-Anlagen

---

[55] Vgl. Stan (2008), S. 188; ADAC (URL: http://www.adac.de/Auto_Motorrad/Tanken/ Alternative_Kraftstoffe/Autogas/technik_umwelg/)
[56] Vgl. Stan (2008), S. 188
[57] Die Fischer-Tropsch-Synthese ist im Jahre 1925 Verfahren zur Umwandlung von Synthesegas in flüssige Kohlenwasserstoffe.
[58] Vgl. Shell (URL: http://www.shell.de/home/content/deu/innovation/managing_emissions/ getting_cleaner/gtl/)
[59] Vgl. BMVBS (2004), S. 3-17
[60] Vgl. VDA (2005), S. 12
[61] Vgl. Umweltbundesamt (2006), S. 31
[62] Vgl. Shell (URL: http://www.shell.de/home/content/deu/innovation/managing_emissions/ getting_cleaner/gtl/)

in Deutschland nicht wirtschaftlich. In erdgas- und erdölfördernden Gebieten aber, aus denen sich der Transport von Erdgas durch Pipelines oder in verflüssigter Form (LNG) als nicht möglich oder unwirtschaftlich erweist, ist der Aufbau von GTL-Anlagen durchaus sinnvoll, um die sonst ungenutzt abgefackelten Mengen von Erdgas für die GTL-Herstellung zu verwenden. So lässt sich einerseits die Lieferung in die Abnehmerländer ermöglichen, andererseits senkt es die sinnlosen CO_2-Emissionen, die durch das Abfackeln entstehen[63].

Neben GTL ist die Produktion eines synthetischen Kraftstoffes aus Kohle durch die Fischer-Tropsch-Synthese möglich. Dieser wird Coal to Liquid (CTL) genannt und ist besonders für Länder mit reichen Kohlelagerstätten (zum Beispiel China) interessant[64]. So wird die Herstellung von CTL in Ländern ohne eigene Erdöl- und Erdgasvorkommen bereits bei Ölpreisen oberhalb der 40,- US-$/Barrel attraktiv[65].

4.2 Biokraftstoffe

4.2.1 Allgemein

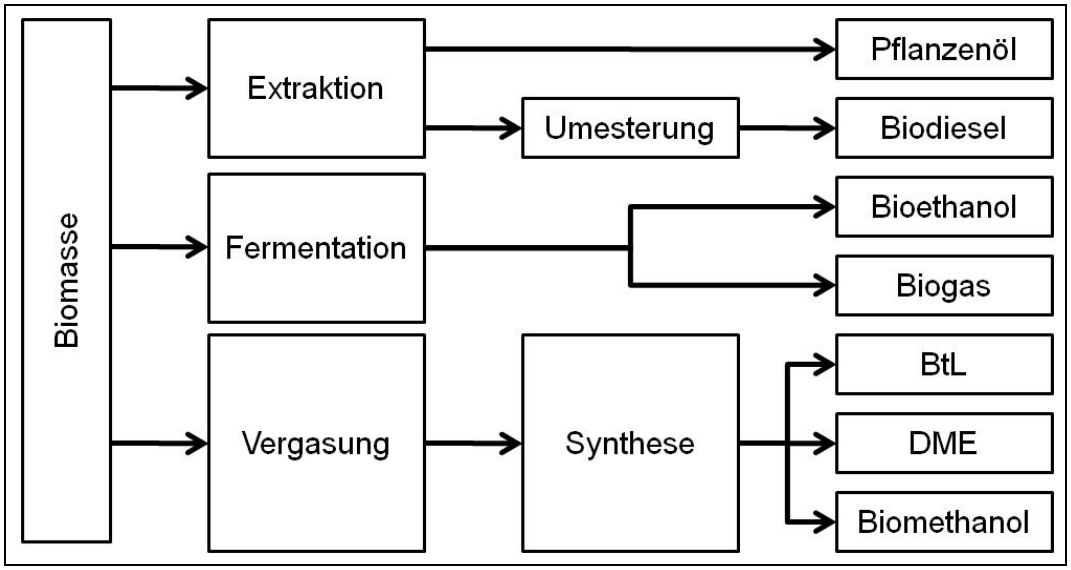
Die Biokraftstoffe sind Kraftstoffe, die aus Biomasse gewonnen werden. Die Rohstoffe der Biokraftstoffe sind regenerativ, sind also in Vergleich zu Erdöl und Erdgas nicht endlich. Bei der Verbrennung von einem Biokraftstoff entsteht genau die Menge an CO_2, wie die Pflanze über die Photosynthese[66] der Atmosphäre entzogen hat, die Verbrennung ist also CO_2-neutral. Während des Bereitstellungsprozesses aber entstehen weitere Emissionen, wie zum Beispiel durch Düngereinsatz oder Energieverbrauch von landwirtschaftlichen Maschinen, die durch die Well-to-Wheel Betrachtung in die Bewertung mit einfließen. Zusätzlich entstehen bei der Produktion von Biokraftstoffen Kuppelprodukte, die andererseits Primärenergie einsparen können[67].

---

[63] Vgl. BMVBS (2004), S. 3-17; VDA (2005), S. 12
[64] Vgl. VDA (2005), S. 12
[65] Vgl. BMVBS (2004), S. 3-17
[66] Die Photosynthese ist ein biochemischer Prozess, bei dem Pflanzen und Bakterien aus Kohlenstoffdioxid, Wasser und Lichtenergie der Sonne Kohlenhydrate aufbauen und Sauerstoff ausscheiden. FVV (2004), S. 13
[67] Vgl. FVV (2004), S. 13

Es wird zwischen Biokraftstoffen der 1. und 2. Generation unterschieden, wobei die Grenzen nicht scharf definiert sind. Im Allgemeinen werden Kraftstoffe, die aus allen Bestandteilen einer Pflanze hergestellt werden, als Biokraftstoffe der 2. Generation bezeichnet[68]. Zudem wird bei den Kraftstoffen der 2. Generation ein Einsparpotenzial der CO_2-Emissionen von bis zu 90 Prozent erwartet. Die Biokraftstoffe der 1. Generation erlauben schon heute rund 50 Prozent weniger CO_2-Emissionen[69]. Die Abbildung 18 zeigt eine Auswahl an Biokraftstoffen und deren Herstellungspfade.

Abbildung 18: Biokraftstoffe und deren Herstellungspfade



Quelle: Umweltbundesamt (2006), S. 30, FVV (2004), S. 16

Desweiteren lassen sich die Biokraftstoffe chemisch in vier Gruppen unterteilen, in Kraftstoffe auf Pflanzenölbasis, Alkohole, Synthetische Kraftstoffe und Wasserstoff. Im Folgenden werden einerseits Biokraftstoffe, die bereits im Einsatz sind, wie Pflanzenöl, Biodiesel und Bioethanol beschrieben. Andererseits werden auch regenerative Kraftstoffe vorgestellt, die heute noch nicht breit eingesetzt werden, aber gute Zukunftschancen aufweisen. Im Rahmen dieser Arbeit wird Wasserstoff gesondert behandelt, da diesem langfristig eine besondere Bedeutung zukommt.

---

[68] Vgl. BP (URL: http://www.deutschebp.de/sectiongenericarticle.do?categoryId=9027353&contentId=7049857)
[69] Vgl. VDA (2008), S. 186

4.2.2 Pflanzenöl

Es existiert eine Vielfalt an Pflanzen aus denen Öle gewonnen und Kraftstoffe produziert werden können, diese sind in der Tabelle 1 aufgelistet. Die wichtigsten sind vor allem Raps und Sonnenblumen in gemäßigten Klimazonen und Sojabohnen, Olivenbäume und Kokospalmen in heißen und tropischen Zonen[70]. Der Herstellungsprozess durch das mechanische Pressen ist relativ unaufwendig, wodurch auch verhältnismäßig wenig Energie verbraucht wird und somit geringe indirekte CO_2-Emissionen entstehen. Die direkten Emissionen von Rußpartikeln liegen um rund 50 Prozent unter den von Diesel. Die Schwierigkeiten bestehen bei der Einhaltung der Emissionsvorgaben und Kraftstoffqualität, wobei die europäischen Emissionsanforderungen EURO IV und V im Pkw-Bereich laut der Automobilindustrie nicht erfüllt werden können[71]. Ferner entstehen beim Anbau der Pflanzen im Boden geringe Mengen an Stickoxiden, was aus ökologischer Sicht nicht vernachlässigbar ist[72].

Tabelle 1: Ölpflanzen und deren Erträge

Ölpflanze	Ertrag (in t Rohöläquivalent/ha*a)	Ölpflanze	Ertrag (in t Rohöläquivalent/ha*a)
Leindotter	0,4	Raps	1,2
Soja	0,4	Pekannussbaum	1,3
Haselnuss	0,4	Babassu-Palme	1,4
Senf	0,4	Jatropha	1,4
Sesam	0,5	Sonnenblumen	1,6
Öldistel	0,6	Jojoba-Baum	1,8
Tungölbaum	0,7	Paranussbaum	1,8
Kakaobaum	0,8	Avocado	2,0
Erdnuss	0,8	Oitica-Baum	2,2
Olivenbaum	0,9	Buriti-Palme	2,4
Moringa-Baum	0,9	Pequi-Baum	2,8
Piassava-Palme	1,0	Macauba-Palme	3,4
Wolfsmilchpflanze	1,0	Pongamia-Baum	3,7
Rhizinus	1,1	Ölpalme	4,4
Bacuri-Baum	1,1	Kokosnuss	5,3

Quelle: Agentur für Erneuerbare Energien e. V. (2009), S. 7

[70] Vgl. Stan (2008), S. 218
[71] Vgl. FNR (2009, S. 80)
[72] Vgl. ADAC (URL: http://www.adac.de/images/ AlternativeKraftstoffe_Pflanzenoel_tcm8-117432.pdf)

Reines Pflanzenöl kann unverändert als Ersatz für Dieselkraftstoff nur in modifizierten Dieselmotoren eingesetzt werden. Grund hierfür ist die hohe Viskosität des Öls. Es besteht die Möglichkeit die Fahrzeuge so umzurüsten, dass wahlweise Diesel oder Pflanzenöl verwendet werden kann. Im Pkw-Bereich bestehen keine Freigaben der Automobilhersteller für Pflanzenöl, so können durch die Verwendung ohne eine entsprechende Modifizierung Schäden am Motor entstehen[73].

Aufgrund des niedrigeren Preises gegenüber Dieselkraftstoff waren die Umrüstung und der Einsatz von Pflanzenöl lange wirtschaftlich attraktiv. Durch die zunehmende Besteuerung wird zukünftig allein die Verwendung im steuerfreien Bereich der Land- und Forstwirtschaft ökonomisch sinnvoll bleiben. Derzeit werden nur Kraftfahrzeuge für den Agrarbereich mit pflanzenöltauglichen Motoren gefertigt. Da das reine Pflanzenöl nur einen Nischenmarkt für Agrarfahrzeuge bedient, wird dieser Kraftstoff an dieser Stelle nicht weiterbehandelt[74].

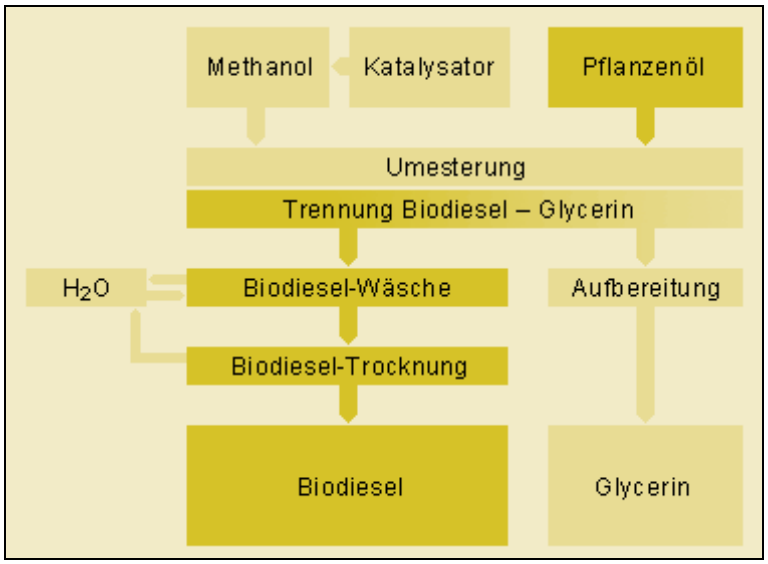
4.2.3 Biodiesel

Der Biodiesel wird wie auch das Pflanzenöl zu den Biokraftstoffen der 1. Generation gezählt. Das Pflanzenöl dient dabei für Biodiesel als Ausgangsrohstoff. Um den Nachteil der hohen Viskosität von Pflanzenöl entgegenzuwirken, die Eigenschaften dem fossilen Dieselkraftstoff anzugleichen und an die Motorentechnologie anzupassen, wird eine chemische Umsetzung von Fetten und Ölen mit Methanol durchgeführt. Diese chemische Reaktion wird Umesterung genannt. Dabei wird dem Pflanzenöl Methanol beigemischt und in der Gegenwart eines Katalysators erwärmt. Das Glycerin und Methanol tauschen während des chemischen Prozesses den Platz, es entsteht das Fettsäuremethylester (FAME, auch Biodiesel genannt) und Glycerin als Kuppelprodukt. Durch weitere Reinigungsprozesse werden die volle Qualität und das optimale Fließverhalten von Biodiesel erreicht[75]. Das heute bei der Umesterung verwendete Methanol stammt aus fossilen Quellen, dieses könnte in der Zukunft durch das Methanol aus der Biomassenvergasung beziehungsweise -erzeugung oder Ethanol ersetzt werden[76]. Zudem bedarf

[73] Vgl. Stan (2008), S. 218
[74] Vgl. FNR (2009), S. 80
[75] Vgl. VDB (URL: http://www.biokraftstoffverband.de/de/biodiesel/herstellung.html)
[76] Vgl. BMELV (2005), S. 31

die Umesterung einen hohen technischen Aufwand und hohen Energieaufwand[77]. In Abbildung 19 wird der gesamte Herstellungsprozess von Biodiesel grafisch dargestellt.

Abbildung 19: Herstellungsprozess von Biodiesel



Quelle: VDB (URL: http://www.biokraftstoffverband.de/de/biodiesel/herstellung.html)

Der Biodiesel ist ein aus Europa stammendes Produkt und wird in Deutschland überwiegend aus Rapsöl gewonnen. Der aus Rapsöl gewonnene Biokraftstoff wird Rapsölmethylester (RME) genannt. Für die Umesterung wird Methanol in einem Verhältnis 1:9 zum Pflanzenöl gemischt. Als Katalysator wird Natrium- oder Kaliumhydroxid benötigt, das bei einer Temperatur von 50 bis 80 °C zugeführt wird[78].

Bei der Herstellung von RME werden etwa 10 Prozent des Pflanzenöls als Glycerin abgetrennt und durch das fossile Methanol ausgetauscht. Neben dem Kuppelprodukt Glycerin, das in der chemischen Industrie Verwendung findet, entsteht auch Rapsschrot, ein proteinreiches Futtermittel. Bei der Herstellung von RME fällt durchschnittlich pro einen Liter Rapsöl ein Kilogramm Rapsschrot an.

Mittels Umesterung erreicht RME ähnliche Eigenschaften wie Diesel in Bezug auf Viskosität und Zündwilligkeit. Die Zugabe von Additiven gewährleistet die

[77] Vgl. Stan (2008), S. 219
[78] Vgl. FNR (URL: http://www.bio-kraftstoffe.info/kraftstoffe/biodiesel/herstellung.html)

Wintertauglichkeit des Biokraftstoffes bis -20 °C. Zudem ist die Schmierfähigkeit deutlich höher als die vom konventionellen Diesel, was zu einem geringeren Verschleiß des Motors führt. Durch den geringeren Heizwert ersetzt ein Liter RME nur 0,92 Liter fossilen Diesel, so ist mit einem Kraftstoffmehrverbrauch von bis zu 5 Prozent zu rechnen. Der Biodiesel aus Rapsöl kann problemlos mit einem Anteil von bis zu 5 Prozent dem Dieselkraftstoff beigemischt werden, in seiner Reinform kann aber der chemisch aggressivere RME bei nicht freigegebenen Fahrzeugen zu Beschädigungen von Kunststoff- und Gummiteilen führen[79].

Der Biodiesel steht derzeit in zwei Formen für den Endverbraucher zur Verfügung, als 5 prozentige Beimischung zum fossilen Diesel mit der Bezeichnung B5 und als reiner Biodiesel B100. In der Tabelle 2 werden die Stärken und Schwächen von B5 und B100 aufgelistet. Im Jahr 2007 wurden in Deutschland 42,9 Prozent des verbrauchten Biodiesels als Beimischung zum Mineralöldiesel verwendet und 13,9 Prozent an öffentlichen Tankstellen als reiner Kraftstoff angeboten, wie die Abbildung 20 zeigt.

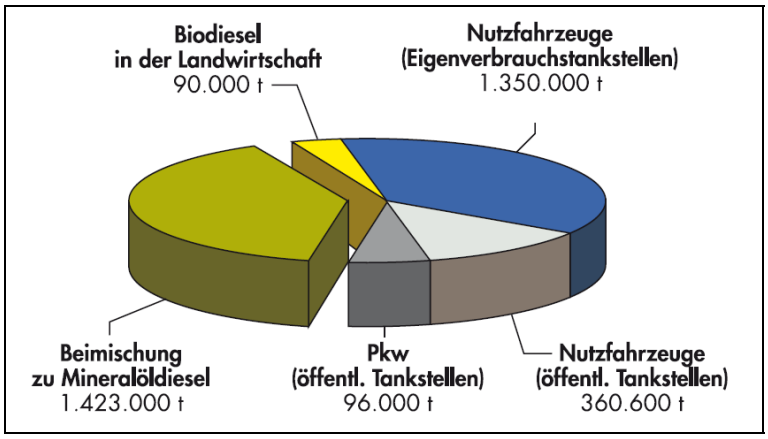
Tabelle 2: Verwendungsformen von Biodiesel in Deutschland

	B5	B100
Beschreibung	Beimischung von 5% Biodiesel zu fossilem Dieselkraftstoff	Reiner Biodiesel (100%)
Anwendungsstand	B5 wird bereits verwendet	Bei PKW und Nutzfahrzeugen mit Abgasnormen Euro IV und V rückläufig
Stärken	• THG-Einsparungen in der gesamten Fahrzeugflotte • Keine Fahrzeuganpassungen nötig • Technologisch unproblematische Beimischung • Öffnet den Markt für Beimischung biogener Kraftstoffkomponenten • Wachsender Dieselmarkt • Qualitätskontrolle unter der Mineralölindustrie	• Verbesserung der Energie- und Treibhausgas-Bilanzen • Preisvorteil für Verbraucher bei derzeitiger Besteuerung • Einsatz in Nutzfahrzeugen und Flotten beliebt • Wachsender Dieselmarkt • Biologisch Abbaubar • Reduktion der Partikelemissionen
Schwächen		• Freigaben notwendig • Rückgang der Freigaben • Bisher keine Freigabe für PKW mit Partikelfilter • Einhaltung Abgasnormen problematisch

Quelle: FNR (2009), S. 79

[79] Vgl. FNR (URL: http://www.bio-kraftstoffe.info/kraftstoffe/biodiesel/eigenschaft-und-qualitaet.html)

Abbildung 20: Verwendung von Biodiesel nach Nutzergruppen 2007



Quelle: FNR (2009), S. 142

Für den Autofahrer ist der Biodiesel durch den niedrigeren Preis gegenüber Diesel attraktiv. Die Preisdifferenz ist zwar nicht auf dem Niveau von Pflanzenöl, hier fallen aber keine Umrüstkosten an. Zudem ist das Tankstellennetz mit 1.900 Stationen deutschlandweit im Vergleich zu 300 öffentlich zugänglichen Pflanzenöltankstellen enger[80]. Negativ wirkt sich aus, dass mit Biodiesel die Abgasnormen Euro IV und V nicht erfüllt werden können, was gegen eine langfristige Zukunftsfähigkeit des Kraftstoffes spricht[81].

Das Emissionsminderungspotenzial von Biodiesel ist durch den energieaufwendigen Herstellungsprozess und den damit verbundenen hohen indirekte Emissionen eher gering. Es wird bereits während des Rapsanbaus durch die Verwendung von stickstoffhaltigem Dünger das klimaschädliche Lachgas N_2O freigesetzt. Zudem wird heute bei der Umesterung fossiles Methanol eingesetzt. Der RME ist aber schwefelfrei, enthält kein Benzol und keine Aromaten, zudem ist er biologisch abbaubar. Weitere ökologische Vorteile hängen von der Nutzung der Kuppelprodukte ab. Durch das im Produktionsprozess entstandene Glycerin kann beispielweise das Glycerin aus fossilen Rohstoffen substituiert werden.

Aus der Sicht der Wirtschaftlichkeit spricht für den Einsatz von RME, dass keine zusätzlichen Kosten für die Infrastruktur im Verkehr notwendig sind. Als Gegenargument dient aber der höhere Bereitstellungspreis verglichen mit fossilem Die-

[80] Vgl. FNR (URL: http://www.bio-kraftstoffe.info/kraftstoffe/biodiesel/verbreitung-tankstellen.html)
[81] Vgl. FNR (2009), S. 72

sel, der nur mittels der Steuerbefreiung wettgemacht wird. Durch die Zunahme der Biodieselproduktion wächst auch das Angebot der Kuppelprodukte, so sind fallende Preise für diese zu erwarten. Der steigende Dieselpreis kann aber die Wettbewerbsfähigkeit von Biodiesel steigern. Heimisch hergestellter RME reduziert die Abhängigkeit von Erdölimporten[82]. Zusätzlich kann der Rapsschrot, der als Futtermittel verwendet wird, den Import von Sojabohnen ersetzen[83].

Neben Rapsöl können auch andere Rohstoffe, wie Palmöl, Sojaöl, tierische Fette oder die Pflanze Jatropha[84] der Herstellung von Biodiesel dienen. Die Tabelle 3 stellt einen Vergleich verschiedener Ausgangsrohstoffe dar.

Tabelle 3: Übersicht Biodiesel aus verschiedenen Rohstoffen

	Diesel	RME	PME	SME	FME / AME	JME
Rohstoffbasis	Erdöl	Rapsöl	Palmöl	Sojaöl	Tierische Fette / Altfett	Jatrophaöl
Heizwert	35,42 MJ/l (43,2 MJ/kg)	33,03 MJ/l (37, 2 MJ/kg)	32,36 MJ/l (37,2 MJ/kg)	32,36 MJ/l (37,2 MJ/kg)	32,68 MJ/l (37,1 MJ/kg)	32,9 MJ/l (37,3 MJ/kg)
Spezifisches Gewicht	0,82 kg/l	0,88 kg/l	0,88 kg/l	0,88 kg/l	0,88 kg/l	0,88 kg/l
Kraftstoff-äquivalent (1l Biodiesel ersetzt…)	-	0,92 l Diesel	0,90 l Diesel	0,90 l Diesel	0,91 l Diesel	0,92 l Diesel

Quelle: FNR (2009), S. 72-78

Das aus Palmöl gewonnene Palmölmethylester (PME) besitzt schlechtere Kaltfließeigenschaften gegenüber RME. Die Preise für das Palmöl sind niedriger als die für Rapsöl und der Einsatz von PME führt zu einer Diversifizierung und Erhöhung der Energieversorgungssicherheit. Dem Sojaölmethylester (SME) dient das Sojaöl, in Deutschland der zweitwichtigste Rohstoff für die Biodieselproduktion, als Grundlage. Verglichen mit RME ist die schlechtere Oxidationsstabilität von Nachteil. Andererseits ist das Produktionspotenzial von Sojaöl größer als die von dem Rapsöl. Das Fettmethylester (FME) wird aus tierischen Fetten hergestellt. Der Produktionsprozess ist, wie auch bei dem aus Altfett gewonnenem AME, gegenüber RME durch die zusätzlichen Schritte der Vorveresterung und Destillation aufwendiger. Durch den Einsatz heimischer Rohstoffe sinkt aber die

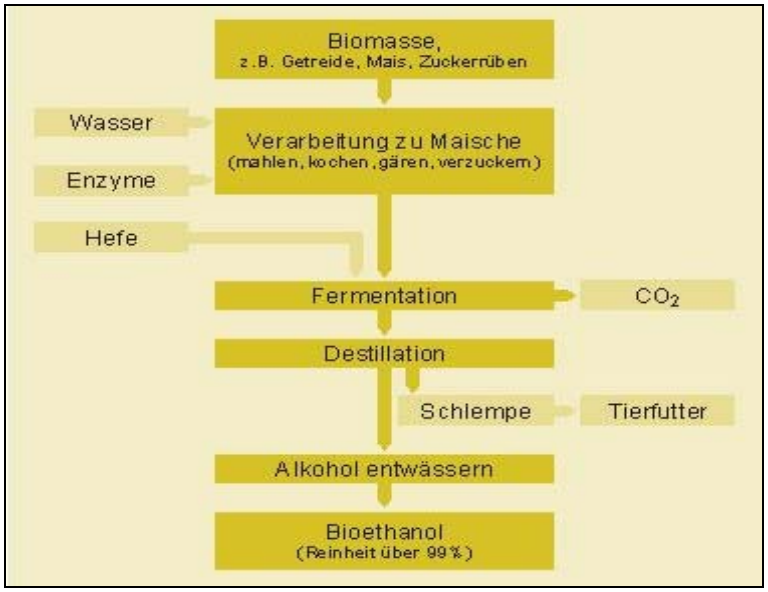
[82] Vgl. FNR (2009), S. 72f
[83] Vgl. Puls (2006), S. 48-50
[84] Die Jatropha ist eine nicht essbare tropische Ölpflanze. Vgl. BP (URL: http://www.deutschebp.de/sectiongenericarticle.do?categoryId=9027353&contentId=7049857)

Importabhängigkeit. Das aus Jatropha hergestellte JME bedarf lediglich der gleichen Produktionsschritte wie auch RME. Die genügsame Pflanze kann auf Böden angebaut werden, die für die Nahrungsmittelproduktion nicht in Frage kommen, so ist hier keine Konkurrenz zu befürchten. Nach Studien sind die Produktionskosten durchaus wettbewerbsfähig, derzeit existieren aber noch keine industriellen Anlagen zur Herstellung. Wie auch andere Rohstoffe würde Jatrophaöl zu einer Diversifizierung beitragen[85].

4.2.4 Bioethanol

Das Bioethanol ist ein Alkohol, dem zucker-, stärke- und zellulosehaltige Pflanzen als Ausgangsrohstoff dienen. Das bereits heute verfügbare Bioethanol ist ein Biokraftstoff der 1. Generation und wird durch Vergärung von pflanzlichem Zucker oder Stärke mit anschließender Destillation hergestellt. Die Abbildung 21 zeigt den Herstellungsprozess von Bioethanol der 1. Generation. Die Produktion von Bioethanol der 2. Generation wird zukünftig aus zellulosehaltiger Pflanzenrestmasse, wie Holz und Stroh, möglich sein. Das Verfahren befindet sich derzeit im Entwicklungsstadium[86].

Abbildung 21: Herstellungsprozess von Bioethanol



Quelle: VDB (URL: http://www.biokraftstoffverband.de/de/bioethanol/herstel-lungbe.html)

[85] Vgl. FNR (2009), S. 73-78
[86] Vgl. BMVBS (2004), S. 3-20; FNR (2009), S. 86

Das Bioethanol der 1. Generation ist der weltweit am breitesten eingesetzte Biokraftstoff und wird in Deutschland aus Weizen und Zuckerrübe, in Brasilien aus Zuckerrohr und in den USA aus Mais hergestellt [87]. Die häufig verwendeten Rohstoffe und deren Flächenerträge werden in Tabelle 4 aufgelistet. In Deutschland liegen die Produktionskosten über den Kosten des Benzinäquivalents, was sich durch steigende Benzinpreise ändern kann. Hierzulande wird Bioethanol hauptsächlich aus Getreide hergestellt, durch steigende Getreidepreise wird die Verwendung der Zuckerrübe attraktiver. Die USA sind führend in der Produktion von Bioethanol. Das hier überwiegend aus Mais erzeugte Bioethanol wird steuerlich begünstigt und nur in den USA abgesetzt. Der zweitgrößte Ethanolproduzent und zugleich größte Exporteur ist Brasilien. Derzeit ist allein das Bioethanol aus Zuckerrohr aus Brasilien durch die hohen Erträge und relativ niedrigen Kosten verglichen mit fossilen Kraftstoffen wettbewerbsfähig[88].

Tabelle 4: Rohstoffe zur Herstellung von Bioethanol und deren Erträge

Rohstoff	Ertrag in t/ha	Kraftstoffertrag in l/ha	Erforderliche Biomasse pro Liter Kraftstoff in kg/l
Körnermais	9,2	3.520	2,6
Weizen	7,2	2.760	2,6
Roggen	4,9	2.030	2,4
Kartoffel	43,0	3.550	12,1
Zuckerrübe	58,0	6.240	9,3
Zuckerrohr	73,8	6.460	11,4

Quelle: FNR (2008), S. 7

Nach heutigen Kraftstoffstandards dürfen bis zu 5 Prozent Bioethanol dem fossilen Benzinkraftstoff beigemischt werden. Diese Kraftstoffmischung wird als E5 bezeichnet. Die 10-prozentige Beimischung mit der Bezeichnung E10 soll ab 2010 an den deutschen Tankstellen zu finden sein, kann aber nicht in allen Fahrzeugen bedenkenlos eingesetzt werden[89]. Für den Einsatz von 85-prozentigem (E85) und auch von reinem Bioethanol (E100) sind spezielle Verbrennungsmotoren notwendig. Die mit solch einem Motor ausgestatteten Fahrzeuge werden Flexi-Fuel-Vehicle (FFV) genannt. Das E85 steht an etwa 250 Tankstellen deutsch-

[87] Vgl. Umweltbundesamt (2006), S. 32
[88] Vgl. FNR (2009), S. 86-90
[89] Vgl. ADAC (2009a), S. 18

landweit dem Autofahrer zur Verfügung[90]. Die Stärken und Schwächen von E5 und E85 werden in der Tabelle 5 aufgelistet.

Tabelle 5: Verwendungsformen von Bioethanol in Deutschland

	E5 / E10	E85
Beschreibung	5% Beimischung zu Ottokraftstoff laut DIN möglich 10% Beimischung motorverträglich	Mischung von 85% Ethanol und 15% Ottokraftstoff
Anwendungsstand	E5 bald flächendeckend E10 in der Vorbereitung	E85-Fahrzeuge (FFV's) in USA, Brasilien und zunehmend Europa
Stärken	• Keine Motorumrüstung nötig • Verbesserung der Energie- und THG-Bilanz • E10-DIN in Vorbereitung	• Hoher Anteil biogenen Kraftstoffs • Anwendbarkeit bewiesen
Schwächen	• Problem Dampfdruck und Wasseraffinität • Kosten durch Beimischung, insbesondere in Einführungsphase • Schrumpfender Ottokraftstoffmarkt • 3,4 Mio. Fahrzeuge nicht E10 tauglich	• Umrüstung notwendig • Kaltstartprobleme im Winter • Aufbau getrennter Infrastruktur nötig von Erzeugung bis Vertrieb • Schrumpfender Ottokraftstoffmarkt

Quelle: FNR (2009), S. 92-93

Das Bioethanol in Reinform ersetzt etwa 0,65 Liter Benzinkraftstoff. Durch die höhere Oktanzahl verglichen mit Benzin wird im Ethanolbetrieb eine Leistungssteigerung von 10 Prozent erzielt, bedingt durch niedrigeren Heizwert ist aber mit einem Mehrverbrauch von 30 Prozent zu rechnen[91].

Die Verbrennung von Bioethanol ist weitgehend CO_2-neutral. Die Schadstoffemissionen sind vor allem von der Herkunft der Primärenergie und der Verwendung der Kuppelprodukte (beispielsweise Futter- und Düngemittel) abhängig. Zusätzlich wird die Umwelt durch den Einsatz von Dünger und Wasserverbrauch beim Rohstoffanbau belastet. Die ökologischen Vorteile werden einerseits mit zunehmender Optimierung der Produktionsprozesse, andererseits mit der Verarbeitung der ganzen Pflanze steigen[92].

Aus ökonomischer Sicht steigt durch den Einsatz von Bioethanol die nationale Versorgungssicherheit und für die Entwicklungsländer öffnen sich durch die Bioethanolproduktion neue Märkte[93]. Da die bestehende Infrastruktur für den Transport, die Verteilung und die Lagerung von Ethanol verwendet werden kann, sind an dieser Stelle keine weiteren Investitionen notwendig.

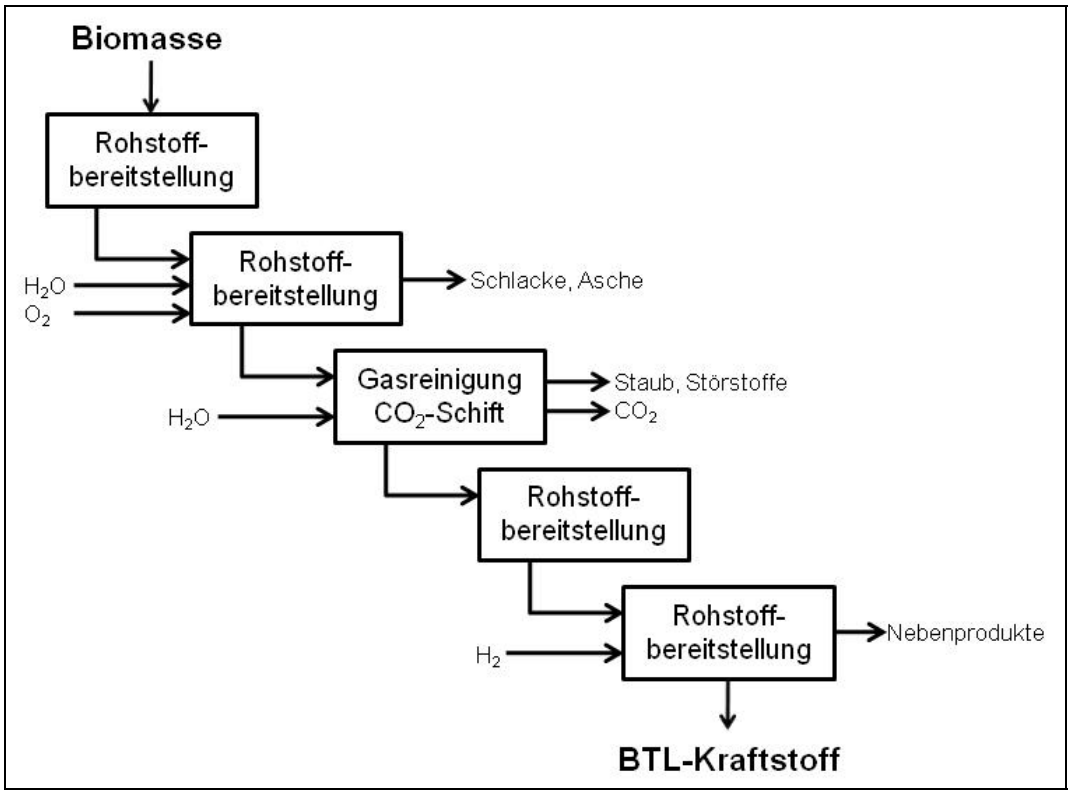
---

[90] Vgl. ADAC (URL: http://www1.adac.de/Auto_Motorrad/Tanken/Alternative_Kraftstoffe/bioethanol/default.asp?ComponentID=134061&SourcePageID=10119#atcm:8-161722)
[91] Vgl. Puls (2006), S. 54
[92] Vgl. Puls (2006), S. 55-57
[93] Vgl. Puls (2006), S. 60

4.2.5 Biomass to Liquid (BTL)

Der Kraftstoff Biomass to Liquid (BTL) zählt zu den Biokraftstoffen der 2. Generation. Das BTL ist, wie auch GTL und CTL (Kapitel 4.1.3), ein synthetischer Kraftstoff. Hier dient aber die Biomasse statt Erdgas beziehungsweise Kohle als Ausgangsrohstoff. Die feste Biomasse wird zunächst unter hohem Druck und hoher Temperatur zu einem Synthesegas verarbeitet, das wie auch bei GTL/CTL anschließend mittels Fischer-Tropsch-Synthese und weiterer Verfahrensschritte in flüssigen Kraftstoff umgewandelt wird[94]. Der Herstellungsprozess von BTL-Kraftstoff wird in der Abbildung 22 schematisch dargestellt.

Abbildung 22: Verfahrensschema der BTL-Herstellung



Quelle: FNR (2008), S. 5

Im Gegensatz zu den Biokraftstoffen der 1. Generation werden bei der Herstellung von BTL die Energiepflanzen vollständig verwertet, zudem ist die Produktion nicht auf eine Pflanzenart beschränkt und auch aus ohnehin anfallenden Reststoffen wie Stroh, Restholz und gar Bioabfällen möglich[95]. Beim Anbau muss

[94] Vgl. VDA (2005), S. 11; BMVBS (2004), S. 3-20
[95] Vgl. FNR (2008), S. 5

einerseits die Fruchtreife der Pflanzen nicht abgewartet werden, so steigen die Hektarerträge. Andererseits können unterschiedliche Pflanzen gemeinsam genutzt werden, was den Anbau umweltverträglicher macht[96].

Ähnlich wie bei anderen synthetischen Kraftstoffen GTL/CTL ist es auch bei BTL möglich, die Eigenschaften des Kraftstoffes im Produktionsprozess zu beeinflussen. So besteht der synthetische Kraftstoff aus weniger unterschiedlichen Kohlenwasserstoffen als Benzin- und Dieselkraftstoff, was den Verbrennungsprozess von der Kraftstoffseite optimiert und den Verbrauch und die Schadstoffbildung senkt[97].

Der BTL-Kraftstoff steht in flüssiger Form zur Verfügung und ist in den heutigen Motoren uneingeschränkt in jedem Mischungsverhältnis nutzbar. Eine Untermischung von mehr als 20 Prozent ist allerdings derzeit mit den geltenden deutschen und europäischen Kraftstoffnormen nicht vereinbar[98]. Die Verteilungsinfrastruktur bedarf keiner Änderungen und somit keiner zusätzlichen Kosten. So besteht bereits heute eine Massenmarkttauglichkeit.

Da Pflanzenmasse als Rohstoffbasis für das BTL dient, ist die Verbrennung CO_2-neutal. Der Kraftstoff ist schwefelfrei und arm an Aromaten. Der Herstellungsprozess ist derzeit komplex und energieintensiv. Bei Verwertung der ganzen Palette in Frage kommender Rohstoffe und optimierter Produktion liegt das CO2-Einsparungspotential aber bei über 90 Prozent. Bereits ohne motorseitige Optimierung führt der Einsatz von BTL zu Schadstoffreduktionen von über 20 Prozent[99].

4.2.6 Dimethylether (DME)

Der Dimethylether ist eine Alternative zum Dieselkraftstoff. Er wird ähnlich wie BTL aus dem Synthesegas hergestellt, das bei der Vergasung von zellulosehaltigen Materialien wie Holz und Stroh entsteht. Der Kraftstoff verspricht gutes Verbrennungsverhalten, bei welchem reduzierte Ruß- und Partikelemissionen erwar-

[96] Vgl. BMVBS (2004), S. 3-21
[97] Vgl. Puls (2006), S. 63
[98] Vgl. Puls (2006), S. 67f
[99] Vgl. VDA (2005), S. 11f

tet werden. Weitere Eigenschaften wie Heizwert und Luftbedarf sind mit dem des Ethanols nahezu gleich. Problematisch ist, wie bei dem Pflanzenöl, eine niedrigere Viskosität verglichen mit Diesel. Im Normalzustand ist DME gasförmig, gespeichert wird dieser unter relativ geringem Druck von 0,5 MPa in flüssigem Zustand. Der Dimethylether bedarf angepasster Verbrennungsmotoren und Infrastruktur[100].

4.2.7 Biogas und Biomethan

Das Biogas entsteht bei der Vergärung von organischen Stoffen, wie Gülle und Mist, landwirtschaftlichen Abfällen, Stroh, Gras aber auch aus kultivierten Energiepflanzen. Das Biogas besteht dabei im Wesentlichen zu 50 bis 60 Prozent aus Methan und zu 40 bis 50 Prozent aus Kohlendioxid. In dieser Form wird es hauptsächlich zur Strom- und Wärmeerzeugung eingesetzt. Um das Biogas als Kraftstoff zu nutzen, ist eine Aufbereitung notwendig. Dabei wird das Biogas in seine Bestandteile zerlegt, so kann das gewonnene Methan als Erdgassubstitut in allen auf Erdgasbetrieb umgerüsteten Fahrzeugen eingesetzt werden[101].

Der Einsatz von Biomethan als erdgasgleicher Kraftstoff ist, trotz besserer Emissionswerte verglichen mit fossilen Kraftstoffen, derzeit aus zwei Gründen nicht wirtschaftlich sinnvoll. Einerseits ist die Erzeugung von Strom und Wärme aus Biogas ökonomischer, als die Aufbereitung zu Biomethan. Andererseits ist das fossile Erdgas günstiger in der Bereitstellung[102].

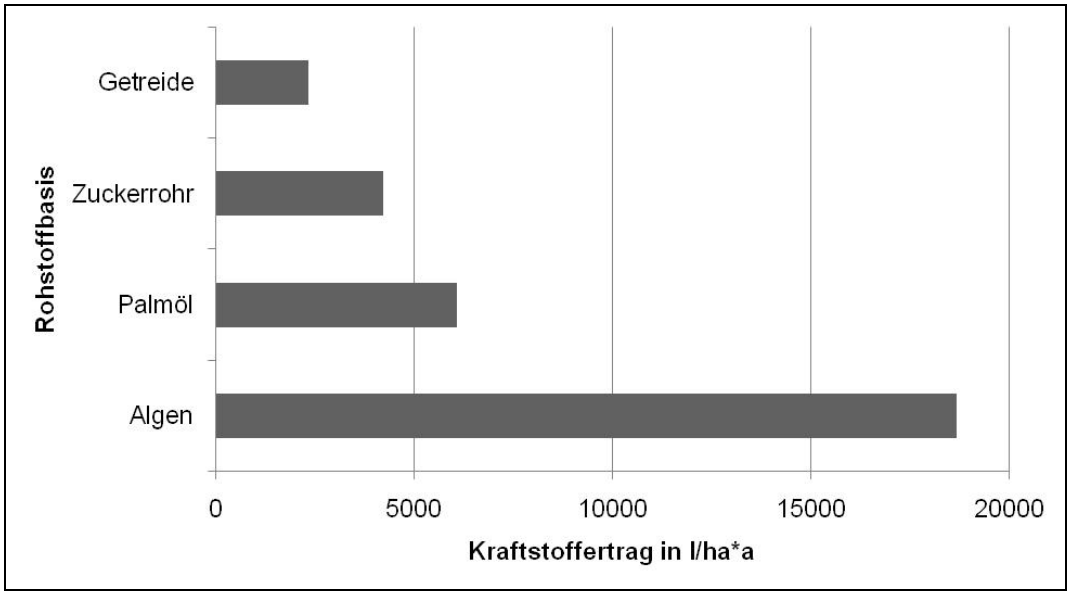
4.2.8 Biokraftstoff aus Algen

Ein im Entwicklungsstadium befindliches Verfahren sieht vor, einen Biokraftstoff aus Algen herzustellen. Es sollen sich aus speziell gezüchteten Algen Öle gewinnen lassen, die mit bereits heute verfügbaren Mitteln zu Diesel-Kraftstoff weiterverarbeitet werden können. Aus kohlenhydratreichen Algen ließe sich daneben Ethanol gewinnen, das als Benzinsubstitut verwendet werden kann[103]. Die Abbil-

[100] Vgl. Stan (2008), S. 226; BMELV (2005), S. 33
[101] Vgl. FNR (2008), S. 100f
[102] Vgl. FNR (2008), S. 101
[103] Vgl. FNR (2009), S. 103

dung 23 zeigt den Kraftstoffertrag der Algen verglichen mit dem von ausgewählten Ausgangsrohstoffen.

Abbildung 23: Kraftstoffertrag aus Algen im Vergleich zu ausgewählten Ausgangsrohstoffen



Quelle: Mouawad (URL: http://www.heraldtribune.com/article/20090714/ZNYT01/907143008?Title=Exxon-to-Invest-Millions-to-Make-Fuel-From-Algae)

Das Unternehmen Exxon plant eine Investition von 600 Mio. US-Dollar in die Entwicklung von Biokraftstoffen aus Algen. Exxon schätzt den Ertrag auf über 18.500 Liter Kraftstoff pro Hektar Anbaufläche und Jahr. Verglichen mit 4.200 Liter Kraftstoff pro Hektar und Jahr aus der Zuckerrohrproduktion wäre dies eine Vervierfachung der flächenbezogenen Erträge[104].

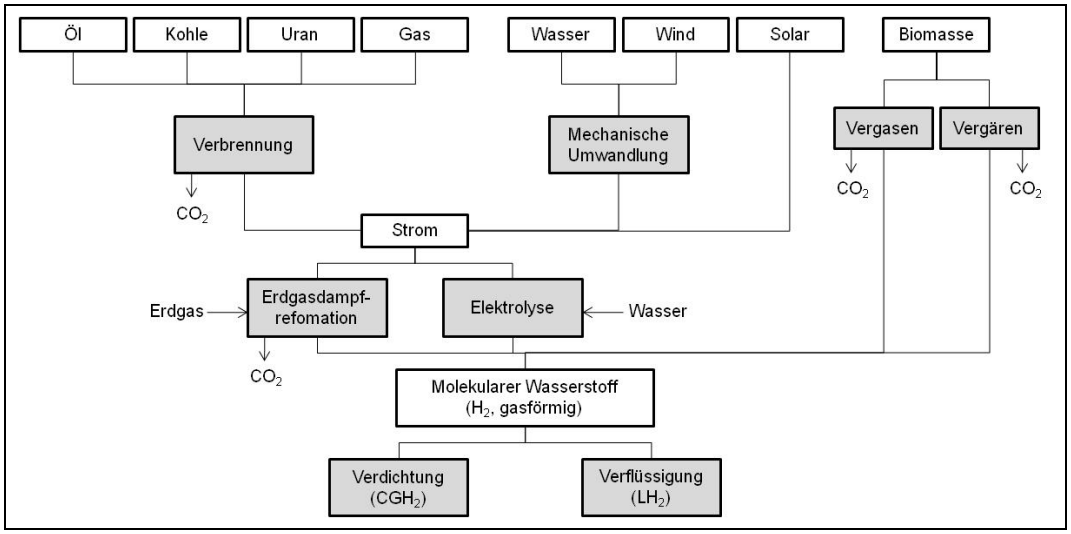
4.3 Wasserstoff

Der Wasserstoff ist das am häufigsten vorkommende Element. Er ist hoch reaktiv und liegt somit fast ausschließlich in gebundener Form vor. Es gibt mehrere Verfahren, um den Wasserstoff in der reinen Form bereitzustellen. Einerseits ist die Produktion mittel Elektrolyse aus Wasser möglich, wobei die elektrische Energie hierfür aus fossilen oder erneuerbaren Energieträgern stammen kann. Andererseits ist die Gewinnung von Wasserstoff durch die Reformation aus wasserstoffhaltigen Verbindungen, meist aus Erdgas durch Erdgasreformation, denkbar. Des Weiteren

[104] Vgl. Mouawad (URL: http://www.heraldtribune.com/article/20090714/ZNYT01/907143008?Title=Exxon-to-Invest-Millions-to-Make-Fuel-From-Algae); Die Daten wurden aus dem britischen in das metrische System umgerechnet und nach Ermessen gerundet.

ist die Wasserstoffproduktion mit Biomasse als Ausgangsrohstoff durchführbar. Beim Vergasen wird aus Biomasse ein wasserstoffreiches Synthesegas erzeugt. Bei der Vergärung entsteht aus geeigneten Ausgangsstoffen ein methanhaltiges Biogas, das zum Wasserstoff aufbereitet wird[105]. Die Abbildung 24 zeigt die Wege der Wasserstoffbereitstellung im Einzelnen.

Abbildung 24: Wege der Wasserstoffbereitstellung



Quelle: Puls (2006), S. 71

Die derzeitige jährliche Produktion beträgt 500 Mrd. m^3, wobei 98 bis 99 Prozent davon aus dem fossilen Rohstoff Erdgas durch den Einsatz erschöpflicher Primärenergieträger hergestellt werden. Nur 1 bis 2 Prozent werden mittels Elektrolyse aus dem Rohstoff Wasser und elektrischem Strom aus regenerativen Quellen erzeugt[106].

Der Transport, die Verteilung und Speicherung des Wasserstoffs kann in flüssiger oder gasförmiger Form erfolgen. Der Flüssigwasserstoff, oder auch Liquid Hydrogen (LH_2) genannt, wird bei einer Temperatur von -253 °C gespeichert, wobei trotz der niedrigen Temperatur nur ein Zehntel der Benzindichte möglich ist. Im gasförmigen Zustand, als Compressed Gaseous Hydrogen (CGH_2), wird Wasserstoff unter hohem Druck von 35 bis 70 MPa gespeichert. Durch die extrem niedrige Temperatur und den sehr hohen Druck erweist sich besonders die Speicherung von Wasserstoff als problematisch, da die Tanks eine komplexe Bauweise und

[105] Vgl. FVV (2004), S. 18
[106] Vgl. Stan (2008), S. 208

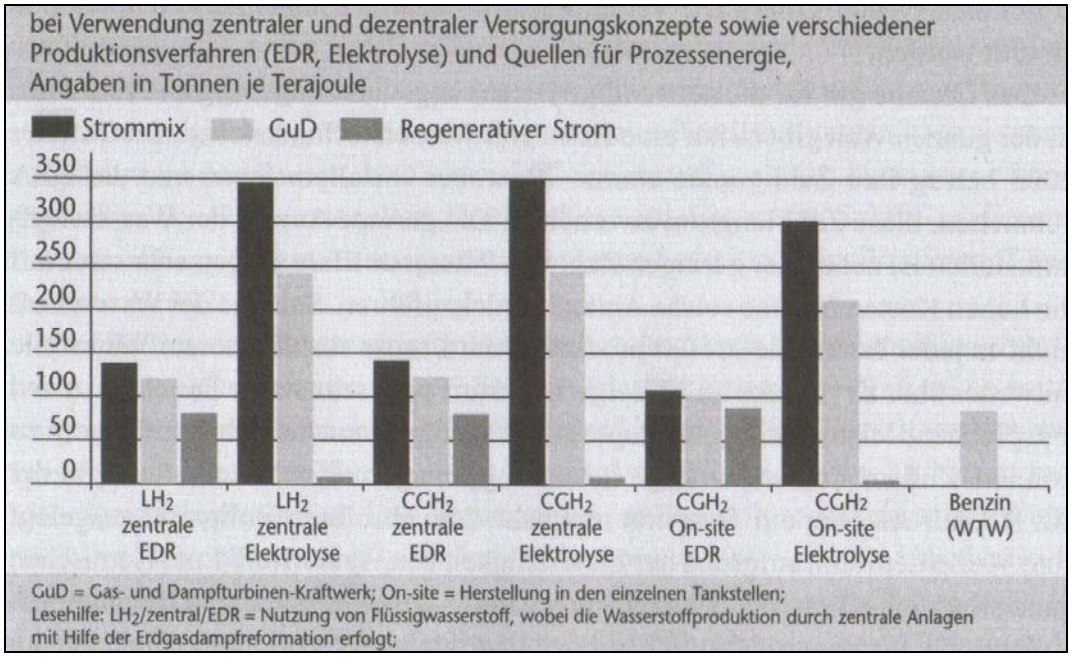
den Einsatz teurer Materialien, wie Platin erfordern. Aufgrund der atomaren Eigenschaften von Wasserstoff ist grundsätzlich mit einem Schwund von etwa 1 Prozent am Tag zu rechnen. Wobei sich das hochentzündliche Gas in Hohlräumen ablagern und so die Gefahr einer Detonation entstehen kann[107].

Aus ökonomischer Sicht ist Wasserstoff als Kraftstoff einerseits durch die unbegrenzten Vorkommen vorteilhaft. Negativ wirkt sich aus, dass für die Verteilung der Einsatz von bestehenden Infrastrukturen, wie zum Beispiel von Erdgaspipelines, nicht möglich ist. Zusätzlich sind aufwendige Lagerungs- und Betankungsinfrastrukturen nötig, wodurch Investitionen in die gesamte Bereitstellungskette entstehen[108]. Dem privaten Autofahrer steht Wasserstoff als Kraftstoff derzeit nicht zur Verfügung.

Bei der Verbrennung in einem Motor beziehungsweise der Reaktion von Wasserstoff mit Sauerstoff entstehen praktisch keine direkten Schadstoffe[109]. Das Versuchsfahrzeug von BMW emittiert beispielsweise hauptsächlich Wasser, nur geringe Mengen an NO_x und nur fünf Gramm CO_2 pro Kilometer[110]. Die energieintensive Herstellung, aufwendiger Transport und Verteilung verursachen aber verglichen mit Benzin hohe indirekte Emissionen. Die Abbildung 25 zeigt einen Vergleich der durch die verschiedenen Herstellungspfade von Wasserstoff entstehenden CO_2-Emissionen, woraus ersichtlich wird, dass besonders die Herkunft des elektrischen Stromes für die ökologische Bilanz verantwortlich ist.

[107] Vgl. Stan (2008), S. 207-209
[108] Vgl. Puls (2006), S. 76-79
[109] Vgl. VDA (2005), S. 13
[110] Vgl. ADAC (2008), S. 31

Abbildung 25: CO_2-Emissionen der Herstellung von flüssigem (LH_2) und gasförmigem Wasserstoff (CGH_2)



Quelle: Puls (2006), S. 77

Der Wasserstoff kann einerseits als Kraftstoff in herkömmlichen Verbrennungsmotoren eingesetzt werden, wobei trotz des hohen Heizwertes aber aufgrund des hohen Luftbedarfs nur niedrigere Leistung verglichen mit Benzinkraftstoff erzeugt wird[111]. Der Wirkungsgrad eines wasserstoffbetriebenen Verbrennungsmotors liegt demnach bei 26 Prozent[112]. Andererseits ist die Reaktion mit Sauerstoff in einer Brennstoffzelle möglich, wodurch elektrischer Strom entsteht und so ein Elektromotor angetrieben wird. Dabei werden Wirkungsgrade von über 37 Prozent erreicht. Der Einsatz und die Funktionsweise der Brennstoffzelle wird in Kapitel 5.3.1 näher beschrieben.

[111] Vgl. Stan (2008), S. 209
[112] Vgl. BMVBS (2004), S. 3-22

5 Alternative Antriebe

Im folgenden Kapitel werden die alternativen Antriebe vorgestellt. Zunächst werden die Bestandteile der elektrischen Antriebe und die Hybridantriebe näher beschrieben und anschließend die Grundzüge der Elektromobilität diskutiert.

5.1 Elektrischer Antrieb

5.1.1 Elektromotor

Der Elektromotor dient dem Antrieb in einem Elektrofahrzeug. Dabei wandelt dieser die elektrische in eine mechanische Energie um. Die Anforderungen an die Elektromotoren gleichen denen der Verbrennungsmotoren. Sie sollen einen hohen Wirkungsgrad aufweisen und eine hohe massen- und volumenbezogene Leistung erbringen. Zusätzlich sollen die Elektromotoren möglichst unaufwendig und kostengünstig in der Herstellung sein[113].

Für den Einsatz im Fahrzeug stehen folgende Elektromotoren zu Verfügung[114]:

- Gleichstrommotoren
    - Gleichstromreihenschlussmotoren
    - Gleichstromnebenschlussmotoren
- Drehstrommotoren
    - Asynchronmotoren
    - Synchronmotoren
        - Permanent erregte Synchronmotoren
        - Fremderregte Synchronmotoren
- Spezialmotoren
    - Bürstenlose Gleichstrommotoren (DC-Brushless-Motors)
    - Transversalflussmotoren
    - Geschaltete Reluktanzmotoren (Switched Reluctance Motors)

Das Funktionsprinzip aller Elektromotoren beruht auf Basis elektromagnetischer Felder, die elektrisch generiert werden und durch Induktion magnetische Kräfte

[113] Vgl. Stan (2008), S. 235
[114] Vgl. Basshuysen, Schäfer (2007), S. 984f

verursachen. Dabei kann das Magnetfeld in der gleichen Lage bleiben (Gleichstrommotor) oder sich drehen (Drehstrommotor). Die Gleichstrommotoren sind durch ihr Funktionsprinzip auf Drehzahlen von 7.000 Umdrehungen pro Minute begrenzt. Die Drehstromasynchronmotoren erreichen hingegen Drehzahlen bis 14.000 Umdrehungen pro Minute und sind zudem relativ unaufwendig und kostengünstig herzustellen. Der Vorteil der Synchron- und Reluktanzmotoren ist der relativ höhere Wirkungsgrad[115]. Die Tabelle 6 stellt einen Vergleich verschiedener Elektromotoren für Elektrofahrzeuge und deren Bewertung nach ausgewählten Kriterien dar.

Tabelle 6: Elektromotoren für Elektrofahrzeuge im Vergleich

	Gleichstrommaschine	Asynchronmaschine	Fremderregte Synchronmaschine	Dauermagneterregte Synchronmaschine	Geschaltete Reluktanzmaschine	Tranversalfluss-maschine
Wirkungsgrad	-/+	+	+	++	+	++
Maximale Drehzahl	--	++	+	++	++	--
Volumen	-	+	+	++	+	+
Gewicht	-	+	+	++	-	+
Kühlung	--	+	+/-	++	++	+
Fertigungsaufwand	-	++	+/-	+	++	+/-
Kosten	+	++	+	+	++	-

Quelle: Basshuysen, Schäfer (2007), S. 985

Der Elektromotor weist mehrere Vorteile gegenüber einem Verbrennungsmotor auf. Er arbeitet sehr reibungsarm, wodurch auch wenig Abwärme entsteht. Der Wirkungsgrad ist mit 80 bis 90 Prozent je nach Drehzahl und Lastzustand gegenüber den konventionellen Verbrennungsmotoren mit ca. 30 Prozent (Benzin) und 40 Prozent (Diesel) besonders hoch[116]. Weiterhin besitzt der Elektromotor eine besonders gute Drehmomentcharakteristik, so liegt bereits ab der ersten Drehzahl annähernd das maximal erreichbare Drehmoment vor. Mit solcher Drehmomentcharakteristik entfällt die Notwendigkeit eines Getriebes und einer Kupplung, wodurch die technische Komplexität des Antriebes in einem Elektrofahrzeug ab-

[115] Vgl. Stan (2008), S. 237-241
[116] Vgl. Auto Motor und Sport (2009), S. 117

nimmt. Zusätzlich ist die Integration eines Elektromotors direkt in die Radnabe möglich. Durch so genannte Radnabemotoren eröffnen sich neue Möglichkeiten für die Automobilhersteller nicht nur in der Raumgestaltung der Fahrzeuge, sondern auch bezüglich der Sicherheit und der Fahrdynamik[117].

5.1.2 Batterie

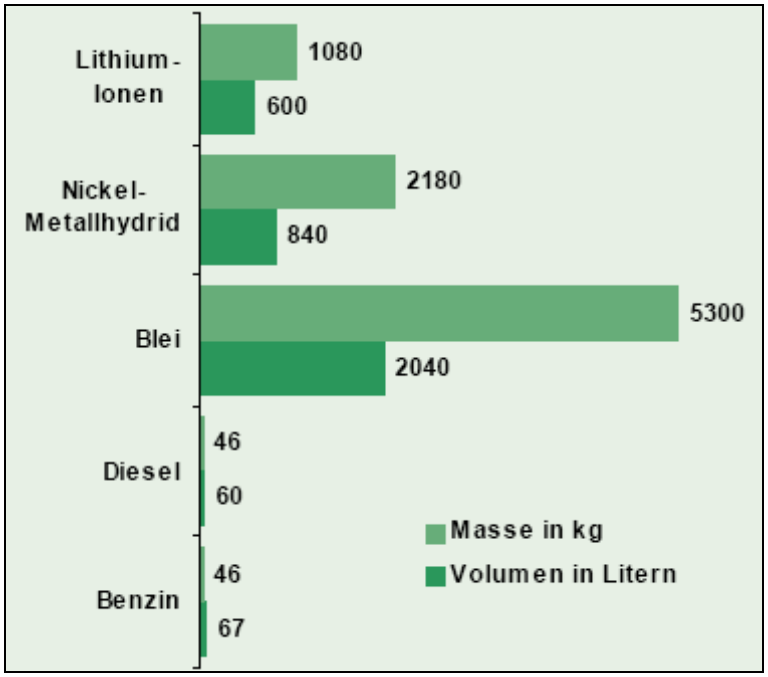
Die Batterien in einem Elektrofahrzeug speichern die benötigte elektrische Energie. In einer Batterie findet grundsätzlich eine Umwandlung von chemischer in elektrische Energie statt. Im engeren Sinne handelt es sich bei den in den Fahrzeugen eingesetzten Batterien um Akkumulatoren, da diese wiederaufladbar sind. Da sich der Begriff Batterie im Sprachgebrauch durchgesetzt hat, wird dieser auch im Rahmen dieser Ausarbeitung verwendet.

Die Batterien als Elektroenergiespeicher bilden derzeit den größten Schwachpunkt der elektrisch angetriebenen Fahrzeuge, da sie eine mangelhafte gewichts- und volumenspezifische Speicherfähigkeit besitzen[118]. Verglichen mit konventionellen Energiespeichern beanspruchen die Batterien verhältnismäßig viel Raum, erhöhen das Gewicht des Fahrzeuges, beschränken die Reichweite und benötigen Zeit für die Aufladung. Die Abbildung 26 stellt einen grafischen Vergleich der Energiedichte und spezifischer Energie der Batterien aus verschiedenen Materialien mit dem Benzin- und Dieselkraftstoff. Zudem sind die Energiespeicher sehr teuer, der Batteriepreis macht etwa ein Drittel des Gesamtpreises von einem elektrisch betriebenen Fahrzeug aus[119].

---

[117] Vgl. Stan (2008), S. 235
[118] Vgl. Puls (2006), S. 69
[119] Vgl. Stan (2008), S. 242

Abbildung 26: Vergleich der Energiedichte und spezifischer Energie verschiedener Speicher



Quelle: Institut der deutschen Wirtschaft Köln (URL: http://www.iwkoeln.de/Portals/0/grafiken/umweltservice/2009/02/09_09_02_energiedichte.gif)

Derzeit finden besonders Blei- und Nickel-Metallhybrid-Batterien Einsatz in den Elektro- und Hybridfahrzeugen. Zukunftsträchtig zeigt sich die Technologie der Lithium-Ionen-Batterien. Sie sind vergleichsweise klein und leicht, besitzen eine höhere Energiedichte und besseren elektrischen Wirkungsgrad. Zu den Nachteilen der Lithium-Ionen-Batterien zählen vor allem die thermische und mechanische Empfindlichkeit[120]. Zusätzlich wirkt sich die geringe Lebensdauer von 2 bis 4 Jahren und die hohen Kosten von etwa 750 Euro/kWh derzeit negativ für den Gebrauch von Lithium-Ionen-Batterien aus[121].

Die Batterien können je nach Einsatz optimiert werden. In reinen Elektrofahrzeugen ist die Energiedichte eine entscheidende Größe, da hier die Reichweite eine wichtige Rolle spielt. In Hybridfahrzeugen ist dagegen die Leistungsdichte bedeutungsvoller, um höhere Leistungen zu erbringen. Unter der Optimierung nach Energiedichte leidet jedoch die Leistungsdichte und umgekehrt[122]. Die Tabelle 7 zeigt die wichtigsten Leistungsdaten von ausgewählten Batterietypen.

---

[120] Vgl. Kroher (2009), S. 33f
[121] Vgl. Stan (2008), S. 242f
[122] Vgl. Basshuysen, Schäfer (2007), S. 985

Tabelle 7: Leistungsdaten von Batterien

Batterietyp	Elektrofahrzeugbatterie (hohe Energie)				
	spez. Energie Wh/kg	spez. Leistung W/kg	Energiedichte Wh/l	Leistungsdichte W/l	Kosten Euro/kWh
Bleisäure	35	200	90	510	100-150
Nickel-Cadmium	50	200	150	600	225-350
Nickel-Metall-Hybrid	70	140	200	400	225-300
Lithium-Ionen	100	200	250	500	k. A.
	Hybridfahrzeuge (hohe Leistung)				
	spez. Energie Wh/kg	spez. Leistung W/kg	Energiedichte Wh/l	Leistungsdichte W/l	Kosten Euro/kWh
Bleisäure	32	430	68	910	100-150
Nickel-Cadmium	35	700	100	2000	225-350
Nickel-Metall-Hybrid	40	1200	100	3000	225-300
Lithium-Ionen	70	2000	150	4200	k. A.

Quelle: Basshuysen, Schäfer (2007), S. 986

5.1.3 Brennstoffzelle

Bei einer Brennstoffzelle handelt es sich um einen Energiewandler. Bei der in einer Brennstoffzelle stattfindenden elektrochemischen Reaktion handelt es sich grundsätzlich um eine umgekehrte Elektrolyse[123], wobei Wasserstoff und Sauerstoff miteinander reagieren und elektrischer Strom entsteht. Der Wasserstoff, aus dem der elektrische Strom erzeugt wird, kann der Brennstoffzelle entweder in Reinform oder in gasförmiger Verbindung (beispielsweise in Form von Erdgas oder Biogas) bereitgestellt werden. Es gibt eine Vielzahl an unterschiedlichen Brennstoffzellentypen (siehe Tabelle 8), die im Prinzip ähnlich aufgebaut sind und damit verfügen alle über, durch einen Elektrolyten getrennte, Anode und Kathode. Der verwendete Elektrolyt entscheidet dabei über den elektrischen Wirkungsgrad, Betriebstemperatur und Produktionskosten[124].

[123] Vgl. Stan (2008), S. 245
[124] Vgl. Puls (2006), S. 83

Tabelle 8: Brennstoffzellentypen und deren Eigenschaften

Brennstoffzelle	Elektrolyt	Arbeitstemperatur	Elektrischer Wirkungsgrad	Brenngas (Oxydant)
AFC (Alkalische Brennstoffzelle)	Kaliliauge	Raumtemperatur bis 90 °C	60-70 Prozent	H2 (O_2)
PEMFC (Membranbrennstoffzelle)	Protonleitende Membran	Raumtemperatur bis 80 °C	50-70 Prozent	H2 (O_2, Luft)
DMFC (Direkt-Methanol-brennstoffzelle)	Protonleitende Membran	Raumtemperatur bis 130 °C	20-30 Prozent	CH_3OH* (O_2, Luft)
PAFC (Phosphorsäure-brennstoffzelle)	Phosphorsäure	180-220 °C	55 Prozent	Erdgas, Biogas, H_2 (O_2, Luft)
MCFC (Karbonatschmelzen-brennstoffzelle)	Alkalicarbonat-schmelzen	620-660 °C	65 Prozent	Erdgas, Kohlegas, Biogas, H_2 (O_2, Luft)
SOFC (Oxidkeramische Brennstoffzelle)	Ytttiumstabilisier-tes Zirkonoxid	800-1000 °C	60-65 Prozent	Erdgas, Kohlegas, Biogas, H_2 (O_2, Luft)

* CH_3OH – Methanol

Quelle: Puls (2006), S. 83

Die verschiedenen Brennstoffzellentypen weisen unterschiedliche Besonderheiten und Anwendungsmöglichkeiten auf, die in der Tabelle 9 aufgelistet sind. Die AFC benötigt für den Betrieb reinen Wasserstoff und reinen Sauerstoff und ist zudem empfindlich gegenüber der Umgebungsluft. Somit ist nur der Einsatz in abgeschlossenen Systemen möglich. Die MCFC und SOFC arbeiten bei sehr hohen Temperaturen, was die Verwendung in einem Fahrzeug ausschließt. Die PAFC erfüllt durch die als Elektrolyt verwendete Säure die Sicherheitsansprüche nicht. Allein die PEMFC eignet sich durch das flexible Betriebsverhalten, hohen Wirkungsgrad und angemessenen Arbeitstemperaturen für den Einsatz als Elektroenergiewandler in einem Fahrzeug[125].

[125] Vgl. Puls (2006), S. 83f

Tabelle 9: Besonderheiten und Anwendungen von verschiedenen Brennstoffzellentypen

Typ	Besonderheiten	Anwendungen
AFC (Alkaline Fuel Cell)	Hoher Wirkungsgrad nur geeignet für reinen Sauerstoff und Wasserstoff	Raumfahrt, Verteidigungstechnik
PEMFC (Proton Exchange Membrane Fuel Cell)	Sehr flexibles Betriebsverhalten, hohe Leistungsdichte	Fahrzeuge, dezentrale Stromerzeugung, BHKW* (kleinere Anlagen)
PAFC (Phosphoric Acid Fuel Cell)	Begrenzter Wirkungsgrad, Korrosionsprobleme	Dezentrale Stromerzeugung, Strom-Wärme-Kopplung
MCFC (Molten Carbonate Fuel Cell)	Komplexe Prozessführung, Korrosionsprobleme	Zentrale und dezentrale Stromerzeugung, Strom-Wärme-Kopplung
SOFC (Solid Oxide Fuel Cell)	Elektrische Energie direkt aus Erdgas, Keramiktechnologie	Zentrale und dezentrale Stromerzeugung, Strom-Wärme-Kopplung

* Blockheizkraftwerk

Quelle: Stan (2008), S. 247

Die PEMFC benötigt für den Betrieb reinen Wasserstoff, der im Fahrzeug meist in Drucktanks gasförmig gespeichert wird. Als Sauerstofflieferant dient die Umgebungsluft. Bei der elektrochemischen Reaktion in einer PEMFC entstehen Wasserdampf und Wärme, die Brennstoffzelle ist also frei von lokalen Schadstoffemissionen[126]. Die PEMFC besitzt einen hohen Wirkungsgrad von 50 bis 70 Prozent, zudem sind Leistungen von 150 kW und mehr möglich. Das Leistungsgewicht beträgt etwa 1,3 kW/kg und das Leistungsvolumen 1,7 kW/l (Stand 2003). Wichtige Aspekte bei der Gestaltung von Brennstoffzellensystemen sind die Entsorgung von entstehendem Wasser, die Abführung der Wärme und die Zufuhr von genügend Sauerstoff[127].

5.2 Hybridantrieb

5.2.1 Allgemein

Der Hybridantrieb ist die Verbindung von zwei unterschiedlichen Antrieben und zwei verschiedenen Energiespeichern in einem Fahrzeug[128]. Hierbei wird der konventionelle Antrieb durch einen Verbrennungsmotor und einen Elektroantrieb kombiniert. Durch diese Kombination versucht man die Schwächen oben genann-

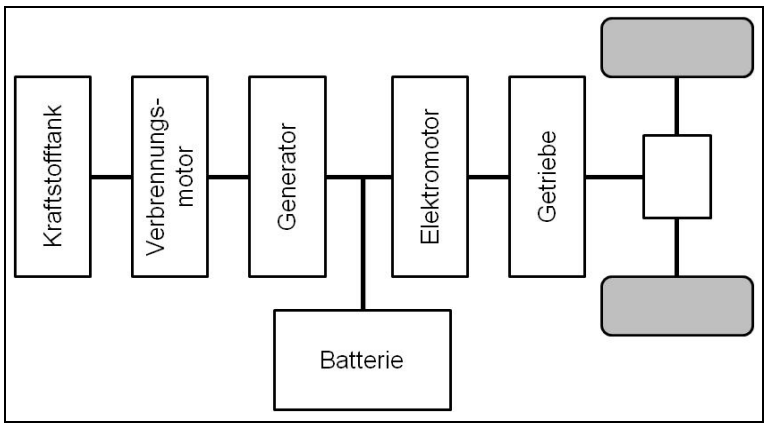
[126] Vgl. Puls (2006), S. 84f
[127] Vgl. Basshuysen, Schäfer (2007), S. 991
[128] Vgl. Basshuysen, Schäfer (2007), S. 978

ter Antriebstechniken entgegenzuwirken. Zum einen soll der Hybridantrieb die geringe Reichweite eines rein elektrischen Fahrzeuges steigern, zum anderen ist es möglich durch die Kombination mit einem Elektromotor die Emissionen und den Kraftstoffverbrauch des Verbrennungsmotors zu senken. Grundsätzlich wird bei den Hybridantrieben zwischen den Seriellen und Parallelen unterschieden, wobei auch Mischformen beider Hybridtypen möglich sind.

5.2.2 Serieller Hybrid

Bei einem seriellen Hybrid sind der Verbrennungsmotor und der Elektromotor hintereinander verbaut, wie die Abbildung 27 darstellt. Der Achsantrieb findet rein elektrisch statt. Der Verbrennungsmotor stellt mittels eines Generators die elektrische Energie bereit. Der Verbrennungsmotor ergänzt so beim Einsatz im seriellen Hybrid das reine Elektroauto als ein so genannter Range Extender (*englisch*: Range – Reichweite; to extend – erweitern). Der heutige Verbrennungsmotor erweist sich beim Einsatz im seriellen Hybrid als vorteilhaft gegenüber den anderen Möglichkeiten der Bereitstellung von elektrischer Energie, wie Batterie und Brennstoffzelle[129]. Die Batterie ist vergleichsweise schwer, groß und teuer. Die Brennstoffzelle ist ebenfalls teuer und zudem technisch sehr komplex.

Abbildung 27: Serielle Anordnung eines Hybridantriebes



Quelle: Gross (2008), S. 37

Der Einsatz in einem seriellen Hybrid erlaubt es, den Verbrennungsmotor im optimalen Drehzahl- und Drehmomentbereich zu betreiben. Die Arbeit im optimalen

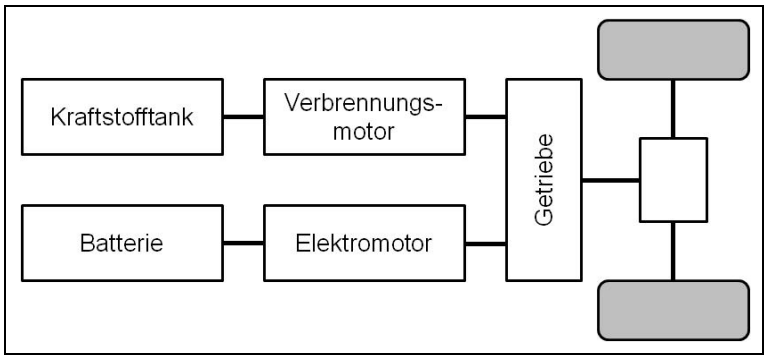
[129] Vgl. Stan (2008), S. 247

Bereich führt neben Downsizing[130] zu Emissions- und Kraftstoffeinsparungen[131]. Zudem ist es vorstellbar den Viertaktmotor durch einen Zweitaktmotor oder eine Gasturbine zu ersetzen. Die Zweitaktmotoren erbringen vorteilhafte 40 bis 60 Prozent an höherer hubraumbezogener Leistung. Die schlechtere Zuverlässigkeit und geringere Lebensdauer gegenüber Viertaktmotoren können durch Weiterentwicklungen ausgeräumt werden[132]. Die Gasturbinen besitzen verglichen mit Hubkolbenmotoren durch die reine Rotationsbewegung einen konstruktiven Vorteil, zudem sind sie kleiner und leichter[133].

5.2.3 Paralleler Hybrid

Bei einem parallelen Hybrid können der Verbrennungsmotor und der Elektromotor unabhängig voneinander arbeiten. Die Anordnung der Antriebe wird in Abbildung 28 grafisch dargestellt. Der parallele Hybrid wird nach Mikro-, Mild- und Voll-Hybrid klassifiziert[134]. Der Antrieb kann so entweder rein elektrisch, konventionell durch den Verbrennungsmotor oder auch durch beide Motoren gleichzeitig stattfinden.

Abbildung 28: Parallele Anordnung eines Hybridantriebes



Quelle: Gross (2008), S. 37

Bei einem Mikro-Hybrid ist kein rein elektrischer Antrieb möglich. Der Elektromotor leistet bei einer Versorgungsspannung von 12 Volt bis zu 6 kW und wird

[130] Downsizing ist ein Konzept zur Verkleinerung des Hubraums und Reduktion der Zylinderzahl im Verbrennungsmotor bei möglichst gleich bleibender Leistung, dies wird hauptsächlich durch die Kombination von Direkteinspritzung und Turboaufladung erreicht.
[131] Vgl. Basshuysen, Schäfer (2007), S. 978
[132] Vgl. Stan (2008), S. 134-144
[133] Vgl. Stan (2008), S. 148f
[134] Vgl. Stan (2008), S. 299f

im Wesentlichen zum Starten des Antriebsverbrennungsmotors benutzt, die so genannte Start-Stopp-Automatik. Zudem ist durch den zusätzlichen Elektromotor die Rückgewinnung der Bremsenergie (Rekuperation) möglich. Die Zusatzkosten für den Mikro-Hybrid belaufen sich auf 300 bis 800 Euro. Die Kraftstoffersparnis beträgt zwischen 3 und 6 Prozent[135].

In einem Mild-Hybrid-System bringt der Elektromotor eine Leistung zwischen 6 und 20 kW bei einer Versorgungsspannung von 42 bis 144 Volt. Zusätzlich zu den Funktionen der Start-Stopp-Automatik und der Rekuperation unterstützt hier der Elektromotor den Verbrennungsmotor beim Anfahren und beim Beschleunigen. Bei zusätzlichen Kosten von 1.000 bis 2.000 Euro ermöglicht ein Mild-Hybrid eine Kraftstoffeinsparung zwischen 10 und 20 Prozent. Auch hier ist kein reiner elektrischer Antrieb möglich[136].

Der Elektromotor in einem Voll-Hybrid leistet mehr als 40 kW bei einer Versorgungsspannung von 250 Volt. Er dient hier einerseits der Drehmomentabsicherung des Verbrennungsmotors, andererseits ist auch der rein elektrische Antrieb möglich, wodurch 30 bis 40 Prozent des Kraftstoffes eingespart werden können. Ein Voll-Hybrid-System verursacht Mehrkosten in Höhe zwischen 4.000 und 8.000 Euro[137].

5.2.4 Exkurs: Hybridantrieb in Opel Ampera und Toyota Prius

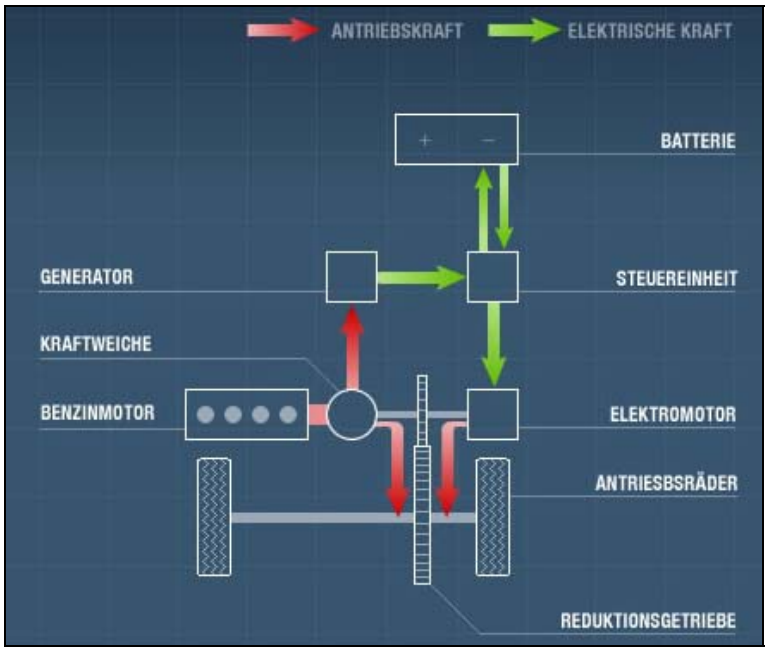
Der Opel Ampera setzt auf einen seriellen Hybridantrieb. Der Antrieb findet rein elektrisch statt, wobei der Elektromotor 111 kW leistet und 370 Nm Drehmoment liefert. Die 16 kWh Lithium-Ionen-Batterie des Ampera erlaubt je nach Belastung etwa 60 Kilometer emissionsfreies Fahren. Ist die Batterie erschöpft, übernimmt der 1,4-Liter Ottomotor als Range Extender die Erzeugung der elektrischen Energie, sodass die Reichweite auf bis zu 500 Kilometer zunimmt. Zudem ist der Opel Ampera ein so genannter Plug-In-Hybrid, die Aufladung der Batterie ist zusätzlich über externe Stromquellen (hier auch durch ein 230 Volt Stromnetz) möglich. Laut Herstellerangaben kostet jeder mit dem Opel Ampera elektrisch gefahrener

[135] Vgl. Stan (2008), S. 299
[136] Vgl. Stan (2008), S. 299f
[137] Vgl. Stan (2008), S. 300

Kilometer 2 Cent, ein mit benzinangetriebenes Fahrzeug verursacht dabei Kosten von 9 Cent pro Kilometer (bei einem angenommenen Kraftstoffpreis von 1,16 Euro). Der Kraftstoffverbrauch des Ampera liegt auf den ersten 100 Kilometern bei 1,6 Liter Benzinkraftstoff, damit betragen die CO_2-Emissionen nur 40 Gramm pro Kilometer[138]. Der Opel Ampera ist ein Produkt des General Motors Konzerns und baugleich mit dem Chevrolet Volt. Der Markteintritt von Opel Ampera ist für das Jahr 2011 in Europa geplant. Der Chevrolet Volt wird zur gleichen Zeit dem Käufer zur Verfügung stehen.

Der Toyota Prius ist das weltweit bekannteste Fahrzeug mit einem alternativen Antrieb. Im Jahr 2009 findet der Markteintritt der dritten Generation statt. Der Prius vereint den seriellen und parallelen Hybrid in einem Misch-Hybrid-System (siehe schematische Darstellung in Abbildung 29). Der Antrieb erfolgt durch den 60 kW starken Elektromotor und durch den 1,8-Liter Ottomotor mit 73 kW. Zusätzlich kann mittels des Verbrennungsmotors Strom produziert werden, der in der Nickel-Metallhybrid-Batterie gespeichert oder direkt zum elektrischen Antrieb genutzt wird[139].

Abbildung 29: Seriell-paralleles Hybridsystem im Toyota Prius



Quelle: Toyota (URL: http://www.hybridsynergydrive.com/de/series_parallel.html)

[138] GM Europe (URL: http://www.opel-ampera.com/deutsch/)
[139] Toyota (URL: http://www.hybridsynergydrive.com/de/series_parallel.html)

Beim Anfahren wird der Toyota Prius allein durch den Elektromotor angetrieben, die elektrische Energie stellt dabei die Batterie bereit. Auch bei niedrigen und mittleren Geschwindigkeiten (bis 45 km/h) wird der Prius rein elektrisch angetrieben, da in diesen Geschwindigkeitsbereichen wie auch beim Anfahren der Verbrennungsmotor nicht mit dem optimalen Wirkungsgrad arbeitet. Im normalen Fahrbetrieb treibt der Ottomotor den Prius an, wobei der Elektromotor unterstützend wirkt. Zudem kann die überschüssige Energie an die Batterie zum Aufladen abgegeben werden, die beim starken Beschleunigen oder elektrischen Fahren entladen wird. Beim Verzögern fließt die sonst ungenutzte Energie zurück in die Batterie (Rekuperation). Im Stillstand werden sowohl der Elektromotor als auch der Ottomotor automatisch ausgeschaltet. Durch dieses komplexe Energiemanagement wird laut Toyota ein Verbrauch von 3,9 Liter Benzinkraftstoff pro 100 Kilometer und 89 Gramm CO_2-Emissionen pro Kilometer erreicht[140].

5.3 Elektromobilität

5.3.1 Allgemein

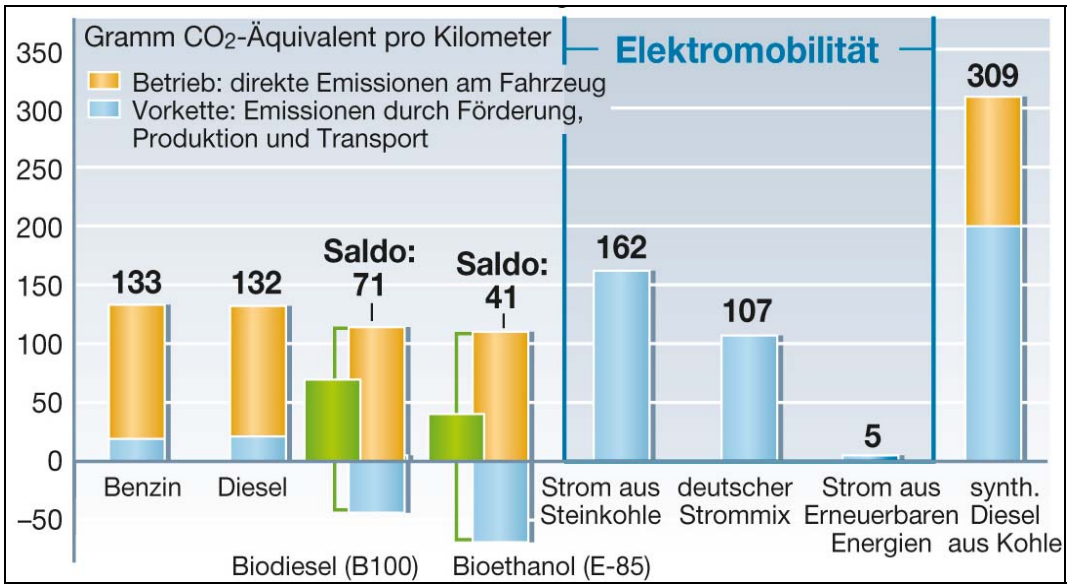
Die Elektromobilität ist bereits heute nicht aus dem öffentlichen Verkehr (zum Beispiel elektrischer Schienenverkehr) wegzudenken. Die Industrie arbeitet derzeit daran, durch die Politik unterstützt, das elektrische Fahren auch für den individuellen Personenverkehr zu erschließen.

Aus ökologischer Sicht weisen die Elektrofahrzeuge einen entscheidenden Vorteil auf, das elektrische Fahren ist frei von lokalen Emissionen, was besonders in städtischen Gebieten günstig ist. Für die Umweltbilanz und Vergleichbarkeit mit anderen Antriebsarten sind zusätzlich die bei der Stromerzeugung entstehenden Treibhausgase heranzuziehen. Folglich verursacht ein Elektroauto mit dem elektrischen Strom, der aus Steinkohle gewonnen wurde, durch die Well-to-Wheel Betrachtung mehr Schadstoffemissionen als ein Benzin oder Dieselfahrzeug, wie die Abbildung 30 zeigt. Stammt der Strom aus dem deutschen Strommix (mit ca.

[140] Toyota (URL: http://www.hybridsynergydrive.com/de/mechanism.html); Mauritz (URL: http://www.automobil-industrie.vogel.de/neue-modelle/articles/188248/?nl=1&cmp=nl-99-1-190509)

14 Prozent an erneuerbaren Energien im Jahr 2007[141]), so betragen die Treibhausgasemissionen etwa 80 Prozent der von Benzin. Im Idealfall sollte der elektrische Strom aus erneuerbaren Energieträgern, wie Sonne, Wind und Biomasse, erzeugt werden, um auch die indirekten Emissionen der Elektrofahrzeuge niedrig zu halten. Ähnliches gilt auch für die Brennstoffzellenfahrzeuge, bezüglich der Primärenergiequelle aus welcher der Strom für die Elektrolyse stammt. Die Abbildung 31 zeigt die eingesetzte Primärenergie zur Stromerzeugung bis in das Jahr 2050. Demnach werden die erneuerbaren Energiequellen an Bedeutung gewinnen.

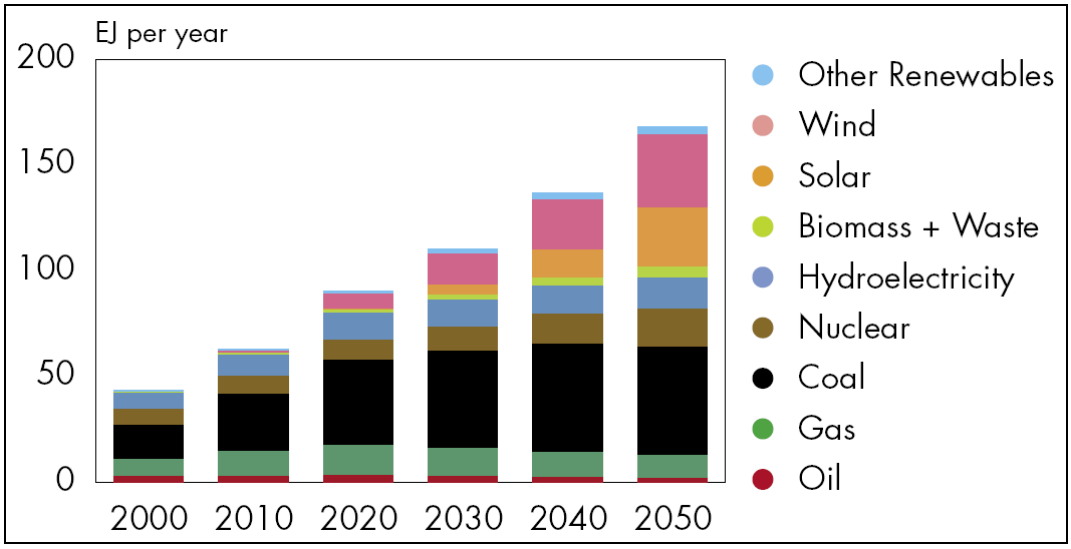
Abbildung 30: Treibhausgasemissionen von Elektrofahrzeugen



Quelle: Agentur für Erneuerbare Energien e. V. (URL: http://www.unendlich-viel-energie.de/uploads/media/EE-Mobilitaet-CO2.jpg)

[141] Vgl. Agentur für Erneuerbare Energien e. V. (URL: http://www.unendlich-viel-energie.de/uploads/media/Endenergiemix-balken.jpg)

Abbildung 31: Stromerzeugung nach Primärenergie 2000-2050



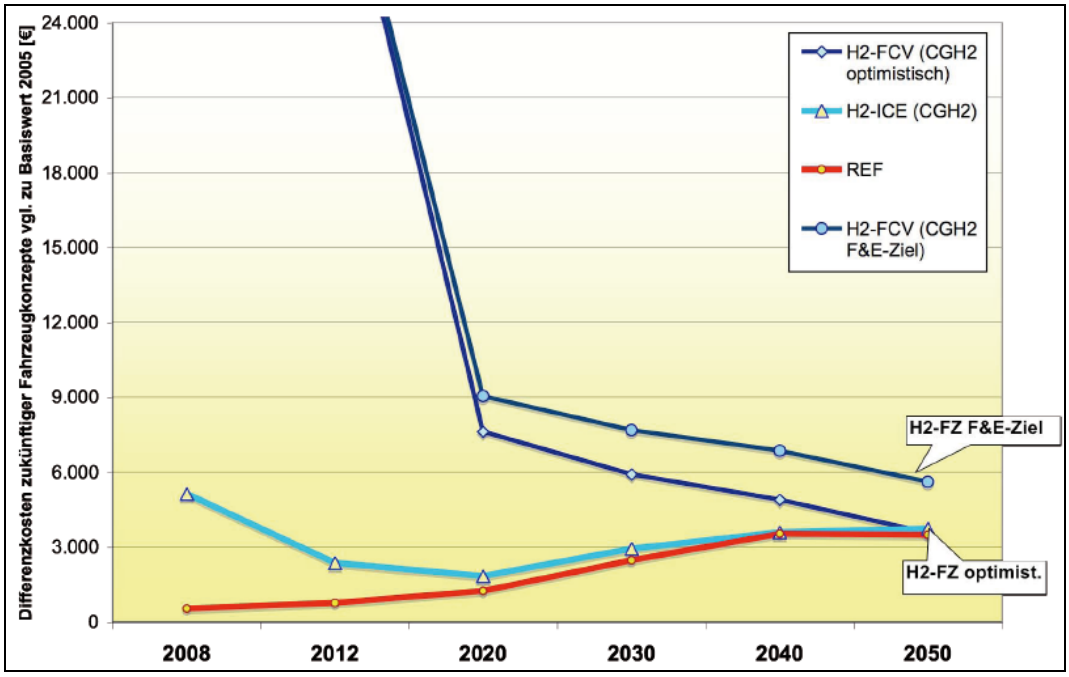
Quelle: Shell (2008), S. 33

Aus ökonomischer Sicht verursacht die Elektromobilität zunächst hohe Kosten bei der Herstellung. So kostet die Hybridisierung bis zu 8.000 Euro pro Fahrzeug[142]. Der Einsatz einer Brennstoffzelle als Elektroenergiewandler führt ebenfalls zu hohem finanziellen Aufwand, die Schätzungen der Kosten für eine Brennstoffzelle sind sehr unterschiedlich und reichen von 500 bis 5.000 Euro pro kW Leistung[143] (zum Vergleich: die Herstellungskosten eines Verbrennungsmotors betragen 30 bis 40 Euro pro kW[144]). Bei angenommenen 60 kW Leistung für ein Fahrzeug bedeutet das, auch bei 500 Euro, Zusatzkosten von 30.000 Euro. Laut dem Umweltbundesamt werden die Zusatzkosten für ein Brennstoffzellenfahrzeug erst im Jahr 2020 unter 10.000 Euro sinken, wie die Abbildung 32 zeigt. Für die Batterie als Energiespeicher gilt Ähnliches, um ein Auto mit einem Gewicht von 1.000 Kilogramm bei einer Geschwindigkeit von 100 km/h über 100 Kilometer zu bewegen wird eine Batterie mit 15 kWh benötigt. Bei einem derzeitigen Preis von 1,30 Euro pro Wh einer Lithium-Ionen-Batterie ist von fast 20.000 Euro an Mehrkosten pro Fahrzeug auszugehen[145]. In der Zukunft ist jedoch durch verbesserte Herstellungsprozesse, steigende Stückzahlen und technologischen Fortschritt mit sinkenden Kosten für die Elektrofahrzeuge zu rechnen.

---

[142] Vgl. Stan (2008), S. 300
[143] Vgl. Gross (2008), S. 30f
[144] Vgl. Gross (2008), S. 14
[145] Vgl. Schmidt (URL: http://www.kfz-betrieb.vogel.de/firmendatenbank/antrieb/articles/192098)

Abbildung 32: Darstellung der Mehrkosten von Wasserstoff-Fahrzeugen

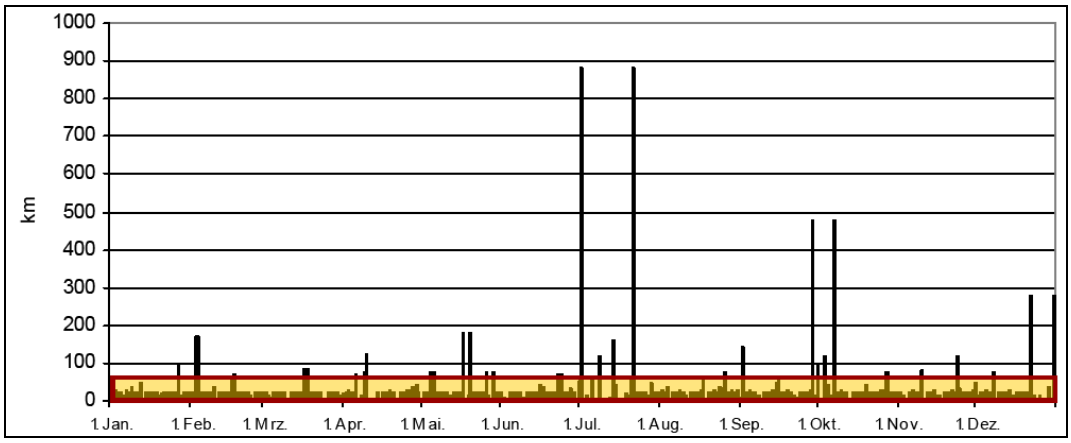


Quelle: Umweltbundesamt (2006), S. 43

Für den Autofahrer ist zu dem höheren Preis der Elektrofahrzeuge, der durch die teure und aufwendige Technik entsteht, die geringe Reichweite ein Grund sich gegen den elektrischen Antrieb zu entscheiden. Der Bestand der Elektrofahrzeuge in Deutschland beträgt demnach im Jahr 2009 ca. 1.500 Stück, was nur 0,0035 Prozent des Gesamtbestandes entspricht. Die Hybridfahrzeuge zählen ca. 22.000 Stück (0,053 Prozent)[146]. Zum Einen ist das elektrisch angetriebene Auto durch die Kapazität der Batterie, zum Anderen bei den Brennstoffzellenfahrzeugen durch das Fassungsvermögen der Wasserstofftanks in der Reichweite beschränkt. Dem entgegen ist aber zu betrachten, dass an über der 80 Prozent der Tage im Jahr das Auto weniger als 40 Kilometer bewegt wird. Die Abbildung 33 zeigt die täglichen Fahrleistungen eines durchschnittlichen Pkw-Nutzers im Jahr 2005.

[146] Vgl. KBA (2009a), S. 23

Abbildung 33: Verkehrsverhalten eines durchschnittlichen Pkw-Nutzers



Quelle: Lahl (2009), S. 6

Die Anforderungen der Elektromobilität lassen die Automobil- und Energieversorgungsbranchen zusammenrücken. So betreiben BMW in Zusammenarbeit mit Vattenfall, Daimler mit RWE und Volkswagen mit EON mehrere Projekte[147], um die Elektrofahrzeuge und die dazugehörige Infrastruktur weiterzuentwickeln und alltagstauglich zu machen. Zwei solcher Ansätze, das Konzept Vehicle to Grid und das Unternehmen Better Place werden im Folgenden vorgestellt.

5.3.2 Vehicle to Grid (V2G)

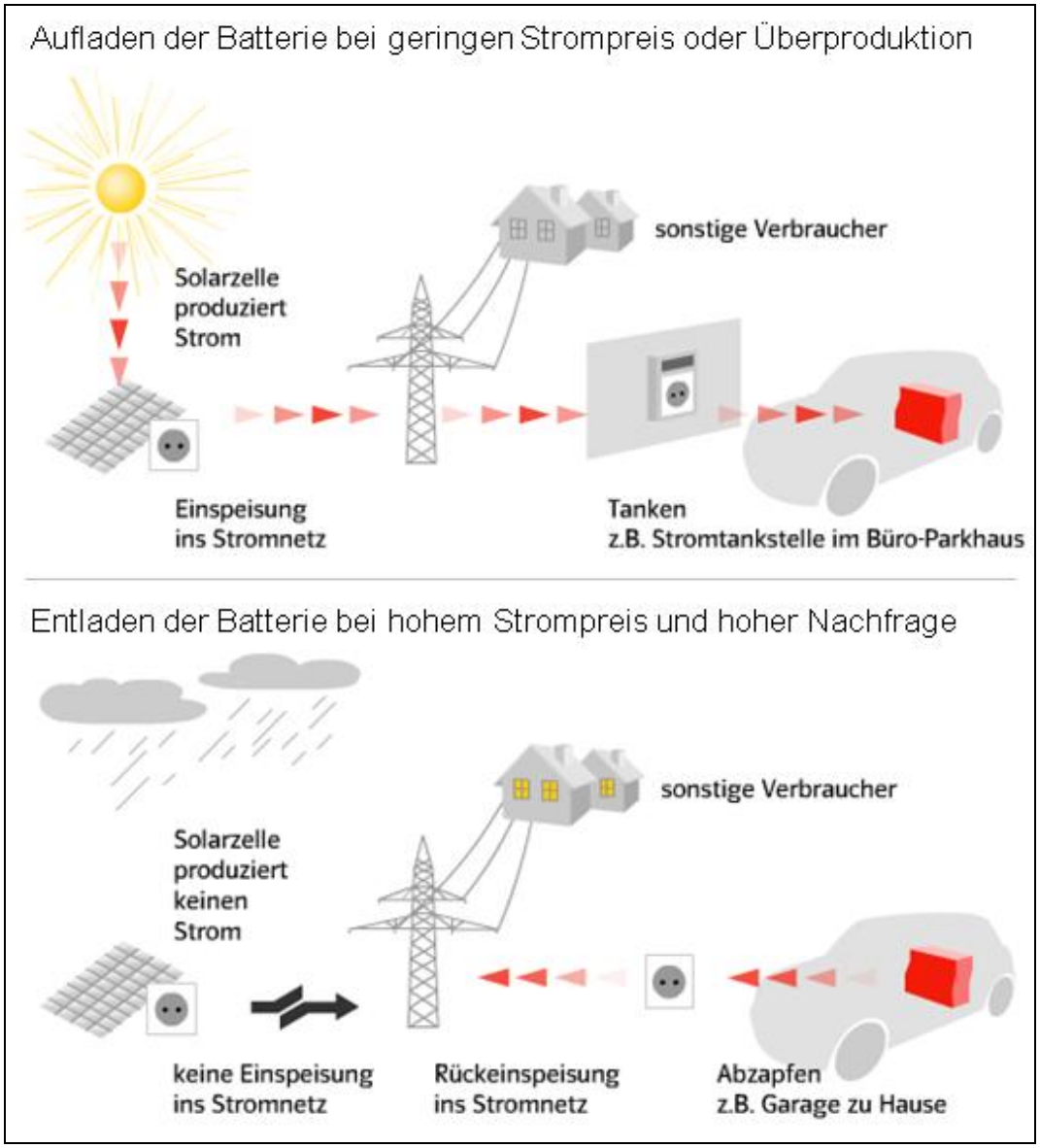
Das Vehicle to Grid (V2G) ist ein Konzept nach dem das Elektrofahrzeug als Stromspeicher genutzt wird. Danach wird die Batterie des Elektroautos aufgeladen, wenn der Strompreis besonders günstig ist (beispielsweise nachts) oder eine Überproduktion des elektrischen Stroms stattfindet. Wenn dagegen der Strompreis hoch ist oder das Angebot an elektrischer Energie die Nachfrage nicht befriedigen kann, wird der Strom aus der Batterie in das öffentliche Netz eingespeist. So können die Stromversorger ihrerseits auf Reservekraftwerke verzichten, die sonst die Nachfrageschwankungen glätten, und der Autofahrer kann seinerseits durch die Preisdifferenz des Stromes zu verschiedenen Uhrzeiten Geld verdienen[148].

Das V2G-Konzept fördert regenerative Energiequellen, wie Wind und Sonne. Da sie elektrischen Strom nur bei entsprechenden Witterungsbedingungen liefern, kann der Angebotsüberhang zeitweise in den Batterien der Fahrzeuge gespeichert

[147] Vgl. Schmidt (URL: http://www.kfz-betrieb.vogel.de/firmendatenbank/antrieb/articles/192098)
[148] Vgl. Schuh (URL: http://www.zeit.de/2009/22/U-Elektromobilitaet)

werden. Bei ungünstigen Wetterverhältnissen wird dann die Energie aus den umweltschonenden Quellen wieder an das Stromnetz abgegeben. Die Batterien benötigen zudem keine Vorlauf- oder Aufheizzeiten, wie andere Kraftwerke, sodass die Energie sofort geliefert oder aufgenommen werden kann[149]. Die Abbildung 34 veranschaulicht solch einen Kreislauf mit der Sonne als Energiequelle.

Abbildung 34: Beispiel des Funktionsprinzips von Vehicle to Grid (V2G)



Quelle: E.ON (URL: http://www.eon-energie.com/pages/eea_de/Innovation/Innovation/ Perspektive_Kunde/Elektroautos_als_Energiespeicher/index.htm)

[149] Vgl. Engel (URL: http://www.dgs.de/fileadmin/files/FASM/ Engel-V2G-Regelenergie-kraftwerk.pdf)

Ein weiterer Vorteil von V2G ist die Mobilität der Energiespeicher. So befindet sich das Fahrzeug meist dort, wo sich auch der Mensch befindet, ob am Arbeitsplatz oder am Wohnort, und kann die Energie bei Bedarf vor Ort bereitstellen. Auf diesem Weg wird nicht nur die zeitliche, sondern auch die räumliche Übereinstimmung von Energienachfrage und Angebot unterstützt.

5.3.3 Better Place

Das Unternehmen Better Place arbeitet an der Entwicklung einer flächendeckenden Infrastruktur für den Betrieb von Elektroautos. Das Unternehmen kooperiert dabei mit namhaften Herstellern zusammen, darunter sind der französisch-japanische Automobilhersteller Renault-Nissan und Batteriehersteller A123 Systems und AESC. Zudem zählen die örtlichen Energieversorger zu den Partnern. Nach den Plänen von Better Place sollen ab dem Jahr 2011 die ersten Elektrofahrzeuge in Dänemark, Israel, Australien, Hawaii, Kalifornien und Ontario fahren[150].

Das Better Place setzt auf Lithium-Ionen-Batterien, die in den zusammen mit Renault-Nissan entwickelten Fahrzeugen eine Reichweite von ca. 160 Kilometer erlauben. Die Lebensdauer von über 8 Jahren und 2.000 Ladevorgängen soll die Batterie zudem alltagstauglich machen. Eine Besonderheit des Infrastrukturkonzepts von Better Place ist, dass zusätzlich zum Aufladen an dem Netz von Ladestationen es dem Fahrer möglich sein wird, die Batterien für eine größere Reichweite an Wechselstationen in kurzer Zeit austauschen zu können[151].

Für den Einsatz der Wechselstationen sind genormte Batterien und Schnittstellen im Fahrzeug notwendig. Durch die Standardisierung würden aber die Automobilhersteller die Kernkompetenz des Batteriemanagements und die Integration im Fahrzeug verlieren. Durch den Wechselvorgang wird Kontaktkorrosion an den Schnittstellen verursacht, was angesichts hoher elektrischer Spannung kritisch ist. Zudem muss jede Wechselstation eine angemessene Anzahl von Batterien lagern, was die Kosten für das Konzept durch den hohen Preis der Energiespeicher steigert[152].

---

[150] Vgl. Schmidt (URL: http://www.kfz-betrieb.vogel.de/firmendatenbank/antrieb/articles/192098)
[151] Vgl. Better Place (URL: http://www.betterplace.com/solution/)
[152] Vgl. Schmidt (URL: http://www.kfz-betrieb.vogel.de/firmendatenbank/antrieb/articles/192098)

6 Bewertung und Gegenüberstellung

Im Rahmen dieser Diplomarbeit wurde zuvor eine Vielzahl an alternativen Kraftstoffen und Antrieben vorgestellt. Die Alternativen wurden beschrieben, deren Vorteile und Nachteile aus der mikroökonomischen Sicht des Autofahrers und aus der makroökonomischen Sicht einer Volkswirtschaft aufgelistet und die grobe Umweltbilanz geprüft. Im Folgenden sollen die Kraftstoffe und Antriebe einander gegenübergestellt und bezüglich deren Energieeffizienz und der Menge von Treibhausgasemissionen über den gesamten Weg von der Quelle bis zum Rad, Well-to-Wheel, bewertet werden.

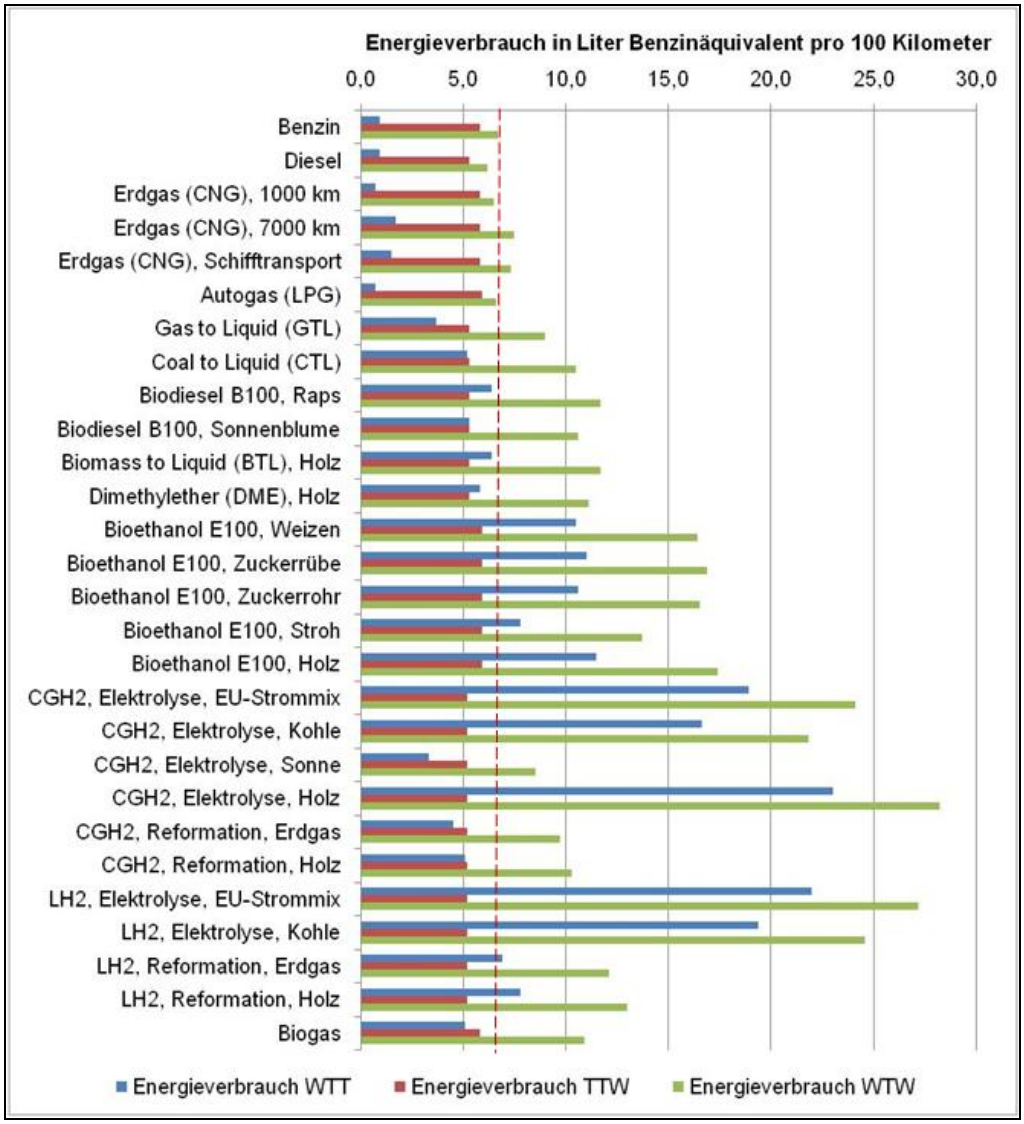
Die Energieeffizienz ist als Maßstab für die Wirtschaftlichkeit zu verstehen. Denn je weniger Energie bei dem Einsatz eines Kraftstoffes oder Antriebes eingesetzt werden muss, desto vorteilhafter ist dieser aus der wirtschaftlichen Sicht. Folglich ist die Energieeffizienz ein ökonomischer Faktor. Der Vergleich der Menge an Treibhausgasemissionen prüft die alternativen Kraftstoffe und Antriebe auf ihre Umweltfreundlichkeit, dementsprechend ist dieser als ökologischer Faktor zu deuten. Die Serienreife beziehungsweise die heutige Verbreitung der jeweiligen Alternativen spielt hierbei keine zentrale Bedeutung. Als Vergleichsbasis und Referenz dient der heute im Pkw-Bereich dominierende Antrieb durch einen Verbrennungsmotor nach dem Ottoverfahren mit Benzinkraftstoff mit einem Energieverbrauch von 6,7 Liter Benzinäquivalent pro 100 Kilometer und 162 Gramm CO_2-äquivalenter Treibhausgasemissionen pro Kilometer.

Die vorliegenden Daten stammen aus den Berechnungen mit der Software Optiresource, die von dem schweizer Unternehmen Protoscar entwickelt wurde und auf der Internetseite des Automobilherstellers Daimler zur Verfügung steht. Die wissenschaftliche Datengrundlage für Optiresource bildet die Studie „Well-to-Wheels Analysis of Future Automotive Fuels and Powertrains in the European Context, Well-to-Wheels Report, Version 2c, March 2007“, die von CONCAWE[153], EUCAR[154] und JRC[155] durchgeführt wurde.

[153] CONCAWE ist eine Gemeinschaft von Mineralölunternehmen zur Erforschung ökologischer Belangen bezüglich der Mineralölindustrie.
[154] EUCAR – European Council for Automotive R&D
[155] JRC – Joint Research Centre (European Commision)

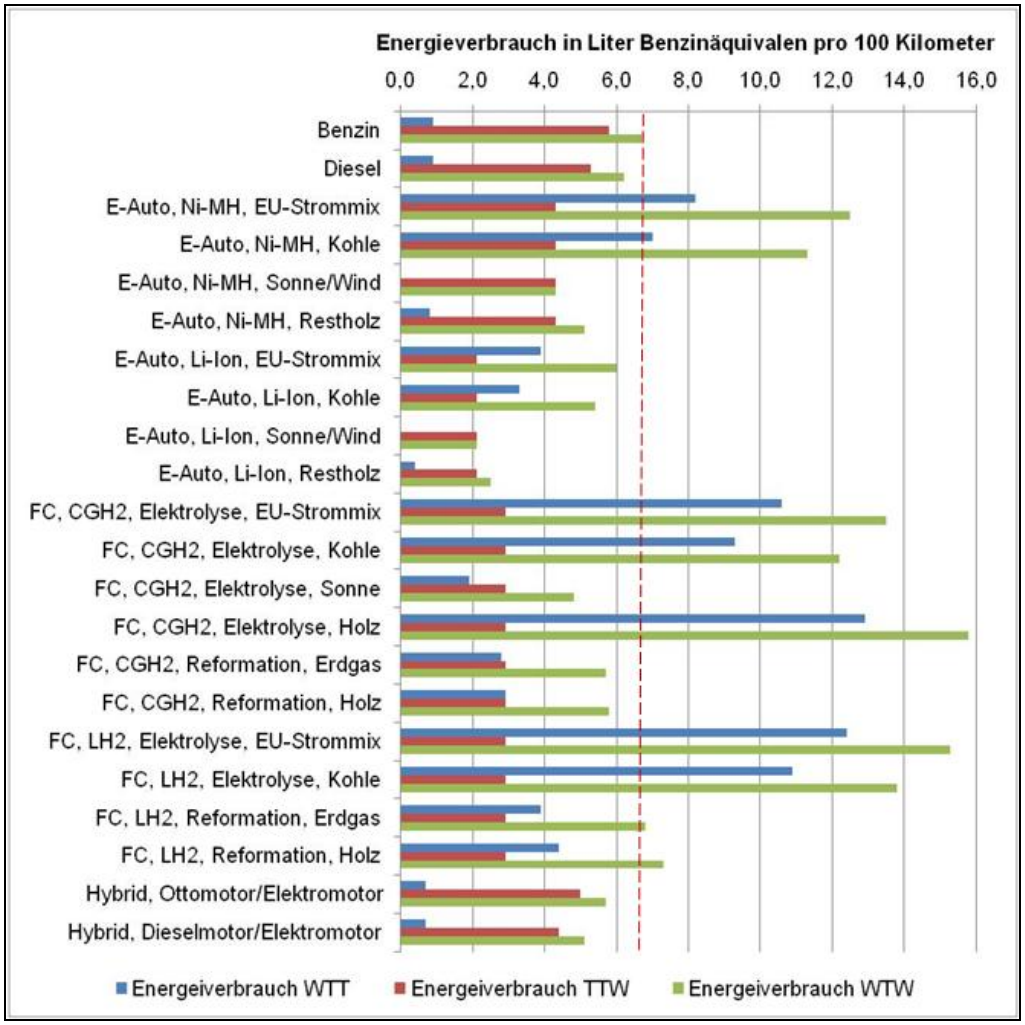
In den folgenden Diagrammen wurden die Daten zusammengetragen und bieten in dieser Form eine klare Übersicht und eine Vergleichsmöglichkeit der einzelnen Antriebe und Kraftstoffe (ausführliche Tabellen finden sich im Anhang). Der Energieeffizienz dient der Energieverbrauch in Liter Benzinäquivalent pro 100 Kilometer als Maßeinheit. Die Treibhausgasemissionen werden in Gramm CO_2-Äquivalent pro Kilometer gemessen. Der Energieverbrauch beziehungsweise die Treibhausgasemissionen wurden zunächst in Well-to-Wheel (WTW), von der Quelle zum Rad, berechnet. Des Weiteren wurden dieselben in Well-to-Tank (WTT), von der Quelle zum Tank, und in Tank-to-Wheel (TTW), vom Tank zum Rad, angegeben.

Abbildung 35: Energieeffizienz alternativer Kraftstoffe



Quelle: Optiresource (URL: http://www2.daimler.com/sustainability/optiresource/)

Abbildung 36: Energieeffizienz alternativer Antriebe



Quelle: Optiresource (URL: http://www2.daimler.com/sustainability/optiresource/)

In der Abbildung 35 und Abbildung 36 ist die Energieeffizienz von alternativen Kraftstoffen beziehungsweise Antrieben dargestellt. In der Abbildung 35 wird es deutlich, dass derzeit allein die alternativen Kraftstoffe aus fossilen Rohstoffen besser in Bezug auf den Energieverbrauch als konventionelle Antriebe abschneiden.

Bei dem Dieselkraftstoff trägt der höhere Wirkungsgrad des Dieselmotors zur höheren Energieeffizienz bei, was sich im niedrigeren Kraftstoffverbrauch ausdrückt. Bei dem Erdgas (CNG) als Kraftstoff ist der Weg der Bereitstellung entscheidend. Wird das Erdgas aus den Fördergebieten der Nord- und Ostsee (1.000 Kilometer) geliefert, liegt der Energieverbrauch WTW unter dem von Benzinkraftstoff. In der Zukunft ist es aber wahrscheinlicher, dass das Erdgas aus der Russischen Föderation über eine längere Entfernung (7.000 Kilometer) importiert

wird, was sich in einem höheren Energieverbrauch ausdrückt. Hier erweist sich die Kompression und der längere Pipelinetransport als energieintensiver. Auch die Verflüssigung von Erdgas und der anschließende Schiffstransport sind aus ökonomischer Sicht derzeit unvorteilhaft. Die Werte von Autogas (LPG) liegen den von Benzin nahe, man bedenke aber, dass das Autogas als ein Nebenprodukt bei der Raffination anfällt und somit der Einsatz durchaus sinnvoll ist. Bei GTL aus Erdgas und CTL aus Kohle ist besonders der Produktionsprozess aufwendiger, was hier in einem höheren Energieverbrauch WTT resultiert.

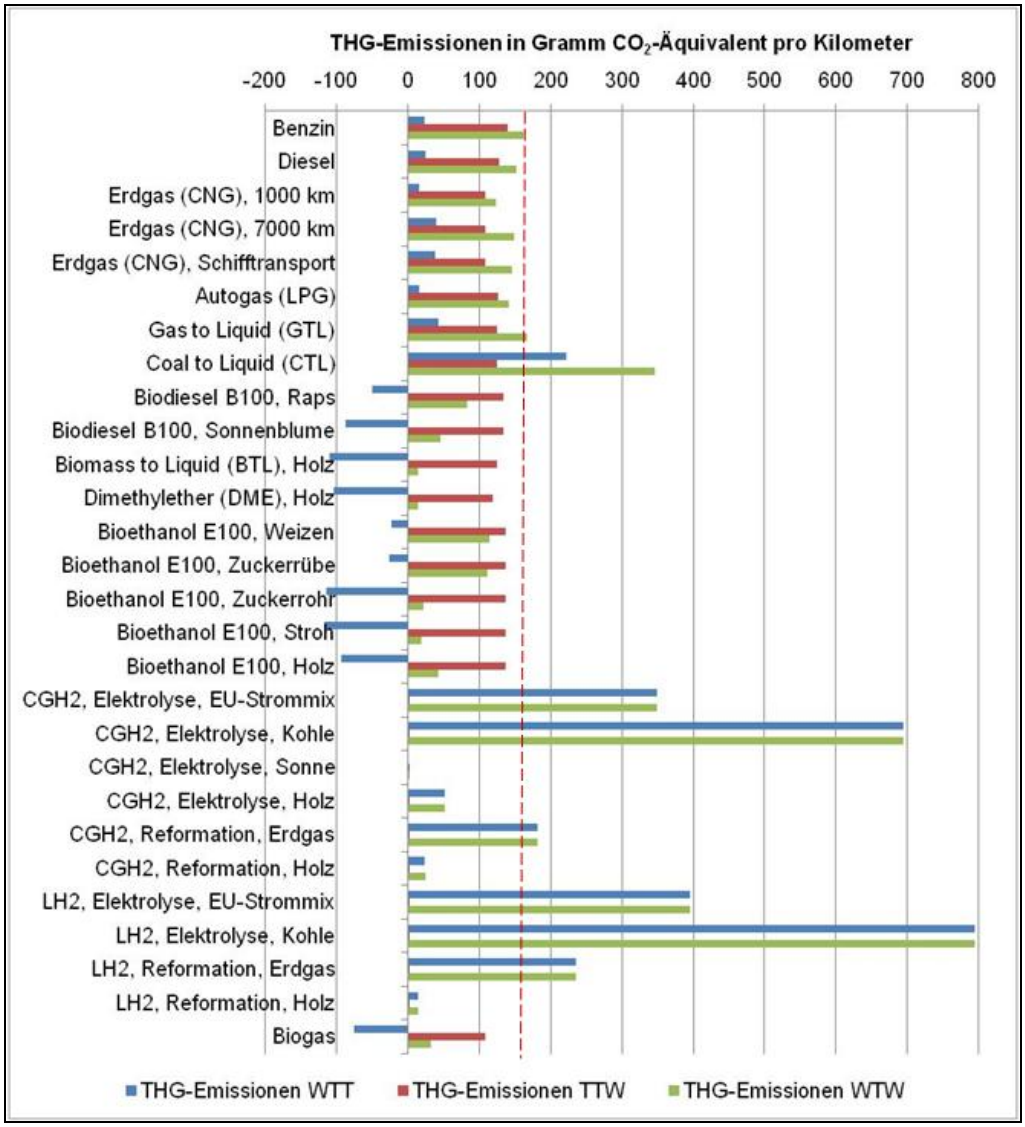
Der Biodiesel, Ethanol, BTL und DME liegen im Energieverbrauch TTW sehr nah bei einander. Bei den Biokraftstoffen ist besonders der Energieverbrauch während des Produktions- und Bereitstellungsprozesses für die Energiebilanz verantwortlich. Hier schneidet das Ethanol durch die aufwendigere Herstellung schlechter ab.

Die Ergebnisse von gasförmigem (CGH_2) und flüssigem (LH_2) Wasserstoff sind den der Biokraftstoffe ähnlich zu deuten. Unabhängig von dem Herstellungsweg, durch die Elektrolyse oder durch die Reformation, ist die Produktion sehr energieaufwendig. Hier erbringt der gasförmige Wasserstoff, durch die Reformation und durch die Elektrolyse mit der Sonnenenergie bereitgestellt, die besseren Ergebnisse. Zusätzlich ist anzumerken, dass die Verflüssigung von Wasserstoff sich im Allgemeinen negativ auf den Energieverbrauch auswirkt.

Bei den Elektrofahrzeugen mit einer Batterie als Elektroenergiespeicher ist es entscheidend aus welcher Primärenergiequelle der elektrische Strom zur Verfügung gestellt wird, wie in der Abbildung 36 gezeigt wird. Der europäische Strommix erweist sich dabei als energieaufwendig. Dagegen ist die Stromerzeugung durch die erneuerbaren Energiequellen, wie Sonne und Wind, besonders effizient. Bei den Elektrofahrzeugen mit einer Brennstoffzelle als Energiewandler ist das Herstellverfahren des Wasserstoffs und gegebenenfalls die Herkunft des elektrischen Stromes für den Energieverbrauch von Bedeutung, ähnlich wie auch bei dem Einsatz von Wasserstoff in einem Verbrennungsmotor.

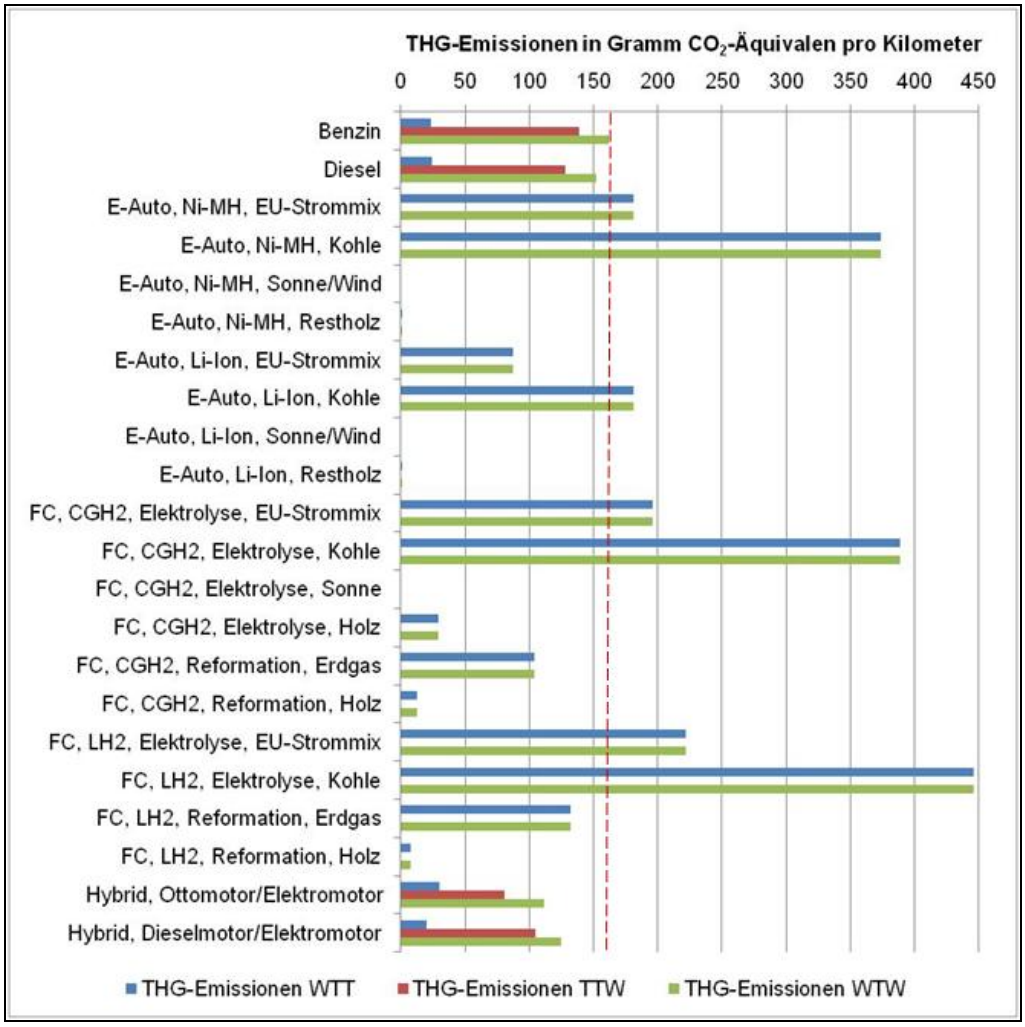
Grundsätzlich weisen die elektrisch angetriebenen Fahrzeuge niedrigeren Energieverbrauch und damit höhere Effizienz gegenüber den Fahrzeugen mit konventionellen Antrieben auf, was vor allem auf den höheren Wirkungsgrad eines Elektromotors zurückzuführen ist. Zusätzlich erweist sich der Einsatz von Wasserstoff als Energiespeicher in einer Brennstoffzelle als effizienter verglichen mit der Verbrennung in einem konventionellen Motor. Die Hybridisierung erlaubt des Weiteren 15 Prozent Energieeinsparung in WTW bei einer Kombination von einem Elektro- mit einem Benzinmotor, respektive über 20 Prozent mit einer Diesel-Elektromotor-Kombination verglichen mit einem benzinbetriebenen Fahrzeug.

Abbildung 37: Treibhausgasemissionen alternativer Kraftstoffe



Quelle: Optiresource (URL: http://www2.daimler.com/sustainability/optiresource/)

Abbildung 38: Treibhausgasemissionen alternativer Anriebe



Quelle: Optiresource (URL: http://www2.daimler.com/sustainability/optiresource/)

Die Abbildung 37 und die Abbildung 38 stellen die Treibhausgasemissionen der bereits zuvor aufgezeigten Kraftstoffe und Antriebe dar. Im Einzelnen wirkt sich bei den alternativen fossilen Kraftstoffen der Energieverbrauch auch relativ auf den Ausstoß der Schadstoffe aus. Grundsätzlich emissionieren erdgas- und autogasbetriebene Fahrzeuge weniger Treibhausgase als der Referenzantrieb. Beim Erdgas wird es zudem ersichtlich, dass sich der energieaufwendigere Pipelinetransport über die 7.000 Kilometer sowie der Schiffstransport in höheren Treibhausgasemissionen verglichen mit dem Transport über 1.000 Kilometer auswirken. Die bessere Umweltbilanz der alternativen fossilen Kraftstoffe wird verglichen mit Benzinkraftstoff von den geringeren TTW Treibhausgasemissionen herbeigeführt. Ausgenommen sind GTL und CTL, da diese durch den energieaufwendigen Herstellungsprozesse mehr Schadstoffe in WTW ausstoßen.

Die Kraftstoffe der 1. und 2. Generation aus Biomasse weisen durchweg negative CO_2-äquivalente WTT-Emissionen auf. Dies kann darauf zurückgeführt werden, dass die Pflanzen während des Anbaus mehr Kohlendioxid der Umgebungsluft entzogen haben, als sie an diese freigegeben haben. Die Kraftstoffe mit Pflanzen als Ausgangsrohstoff verursachen somit verglichen mit Benzinkraftstoff geringere WTW Treibhausgasemissionen.

Die Fahrzeuge mit wasserstoffbetrieben Verbrennungsmotoren sind nahezu frei von lokalen Schadstoffemissionen. Die WTW Treibhausgasemissionen sind stark von dem Produktionsprozess des Wasserstoffs abhängig. Grundsätzlich ist hier der Einsatz von erneuerbaren Energieträgern von Vorteil. Ähnlich verhält es sich bei den Brennstoffzellenfahrzeugen, die Umweltbilanz hängt vom Bereitstellungsweg des Wasserstoffs ab. Ferner verursacht der höhere Wirkungsgrad einer Brennstoffzelle gegenüber dem Verbrennungsmotor einen niedrigeren Wasserstoffverbrauch und somit auch geringere Treibhausgasemissionen.

Die Elektrofahrzeuge erzeugen TTW keine Schadstoffemissionen. Die WTW Umweltbilanz ist grundsätzlich von der Menge der Treibhausgase abhängig, die bei der Erzeugung des elektrischen Stromes entstehen. Somit ist der Einsatz von erneuerbaren Energieträger gegenüber fossilen umweltfreundlicher. Durch die Hybridisierung sind bis zu 30 Prozent weniger Treibhausgasemissionen möglich.

Zusätzlich zu den Auswertungen der Energieeffizienz und der Treibhausgasemissionen mit Optiresource zeigt die Tabelle 10 eine Gegenüberstellung ausgewählter Kraftstoffe nach Basshuysen und Schäfer (2007). Hierbei werden außer den Emissionen verschiedener Klimagase auch Kriterien wie die Eignung, die Verfügbarkeit, die Wirtschaftlichkeit und die Infrastruktur in Betracht gezogen. Der Benzinkraftstoff dient als Referenz.

Tabelle 10: Gegenüberstellung ausgewählter Kraftstoffe

	Benzin (Referenz)	Diesel mit Partikelfilter	Erdgas (CNG)	Autogas (LPG)	Bioethanol	Biodiesel	Gas to Liquid (GTL)	Biomass to Liquid (BTL)	Wasserstoff (Brennstoffzelle / Verbrennungsmotor)
Eignung	○	○	-	-	-	○	○	○	--/--
Verfügbarkeit	○	○	○	-	-	-	-	-	--/--
Wirtschaftlichkeit	○	+	○/+[2]	○/+[2]	-/+[3]	-/+[3]	+	-/+[3]	--/--
Infrastruktur	○	○	-	-	-	-	○/-[1]	○/-[1]	--/--
CO	○	○	○	○	○	○	○	○	++/+
HC	○	○	○	○	○	○	○	○	++/+
NO_X	○	-	○	○	-	-	-	-	++/○
Partikel	○	○	○	○	○	○	○	○	++/+
CO_2	○	+	+	+	++	++	+	++	++/++

[1] Verteilungsinfrastruktur / Produktionsinfrastruktur
[2] ohne/mit Mineralölsteuerermäßigung bis 2020
[3] ohne/mit Mineralölsteuerbefreiung bis 2009 und landwirtschaftliche Subventionen

Quelle: Basshuysen, Schäfer (2007), S. 977

Der Diesel ist demnach wirtschaftlicher und erzeugt durch den geringeren Kraftstoffverbrauch niedrigere CO_2-Emissionen. Nachteilig gegenüber Benzin wirkt sich der höhere Ausstoß von Stickoxiden (NO_x) aus. Die alternativen fossilen Kraftstoffe und die Biokraftstoffe sind nur durch die Mineralsteuerermäßigung beziehungsweise -befreiung wirtschaftlich vorteilhaft. Sie verursachen aus ökologischer Sicht aber geringere Kohlendioxidemissionen. Da die Verteilungsinfrastruktur auf flüssige Kraftstoffe ausgelegt ist, benötigen die gasförmig und unter Druck stehenden Kraftstoffe, wie CNG, LPG und Wasserstoff, zusätzliche infrastrukturelle Veränderungen. Der große Nachteil der synthetischen Kraftstoffe, GTL und BTL, ist die unzureichende Produktionsinfrastruktur. Derzeit ist der Einsatz von Wasserstoff in einer Brennstoffzelle oder in einem Verbrennungsmotor durch die Faktoren Verfügbarkeit, Wirtschaftlichkeit und Infrastruktur nicht sinnvoll. Der Wasserstoff erbringt dennoch deutliche Vorteile bezogen auf die Emissionen von schädlichen Gasen.

7 Schlussfolgerung

Der Umstieg auf alternative Kraftstoffe und Antriebe ist in der Zukunft unumgänglich, wie bereits im Kapitel 2 diskutiert wurde. Kurz- bis mittelfristig werden dennoch die konventionellen Antriebe mit Benzin- und Dieselkraftstoff dominieren. In der näheren Zukunft steht somit die Ausschöpfung der Potenziale von Verbrennungsmotoren und Abgasreinigungssystemen in dem Vordergrund. Damit sind die Stichworte wie Downsizing, Direkteinspritzung und variable Ventilsteuerung zu verknüpfen[156].

Das Erdgas (CNG) und das Autogas (LPG) werden bedingt durch die Endlichkeit der Rohstoffe und die notwendigen Infrastrukturen ein Nischenprodukt bleiben. Der Einsatz ist dennoch durchaus sinnvoll, da das Autogas als Nebenprodukt bei der Raffination anfällt und das Erdgas vielerorts bei der Förderung von Erdöl verbrannt wird. Weiterhin kann der Aufbau von GTL-Produktionsanlagen in der Nähe von Erdöl- und Erdgasfördergebieten zur Nutzung von Erdgas beitragen.

Die Biokraftstoffe der 1. Generation bieten bereits heute eine Alternative, bringen aber nicht das notwendige Mengenpotential mit und die kostenintensive Bereitstellung ist bei den derzeitigen Erdölpreisen nicht wettbewerbsfähig, ausgenommen das Bioethanol aus Zuckerrohr aus Brasilien. Der technische Fortschritt und die Preisentwicklung von erdölbasierten Kraftstoffen erhöhen die Chancen der Biokraftstoffe der 2. Generation, wie Biomass to Liquid (BTL), Bioethanol aus Zellulose und Biogas, mittel- bis langfristig die Unabhängigkeit von Benzin- und Dieselkraftstoff zu stärken. Zudem ermöglichen die Biokraftstoffe, besonders den Entwicklungsländern mit ausgeprägter Agrarwirtschaft, den Aufbau neuer Wirtschaftszweige.

Der elektrische Antrieb ist besonders durch den hohen Wirkungsgrad der Elektromotoren und das emissionsfreie Fahren vorteilhaft. Die Voraussetzungen für einen mittel- bis langfristigen Erfolg der Elektromobilität sind die Weiterentwicklung der Elektroenergiespeicher beziehungsweise der Elektroenergiewandler und

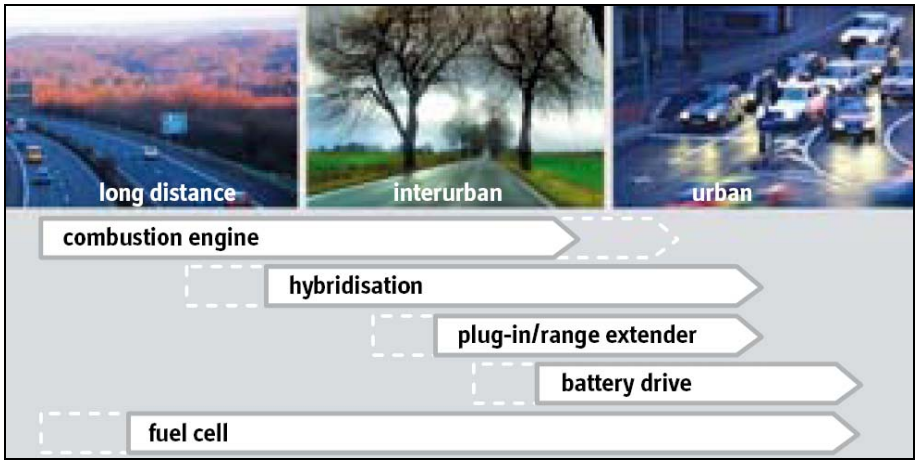
[156] Weitere und ausführliche Informationen zu Potentialen und Trends in der Entwicklung von Verbrennungsmotoren finden sich in Stan (2008).

die effiziente Gewinnung von Wasserstoff. Die Hybridisierung durch die Kombination der Verbrennungsmotoren mit Elektromotoren ist derweil ein Zwischenschritt zu der Elektromobilität.

Aus ökologischer Sicht ist es für die Elektromobilität und den Antrieb durch Wasserstoff entscheidend mit welcher Primärenergie der elektrische Strom, der in der Batterie gespeichert beziehungsweise für die Elektrolyse verwendet wird, erzeugt wurde. Aus ökonomischer Sicht sind infrastrukturelle Konzepte, wie das Vehicle-to-Grid und das vom Unternehmen Better Place, in der Zukunft für das Wachstum der Elektromobilität entscheidend.

Zusätzlich zum zeitlichen Horizont ist die Verbreitung der Elektromobilität vom Einsatzgebiet abhängig, wie in der Abbildung 39 dargestellt. So werden die Elektrofahrzeuge mit Batterie und serielle Hybride voraussichtlich im städtischen Gebiet eingesetzt. Auf langen Distanzen werden die Verbrennungsmotoren dominieren. Die Voll-Hybride und die Brennstoffzellenfahrzeugen haben ein breites Einsatzgebiet und können sowohl innerstädtisch als auch auf Langstrecken eingesetzt werden.

Abbildung 39: Einsatzgebiet verschiedener elektrischer Antriebe

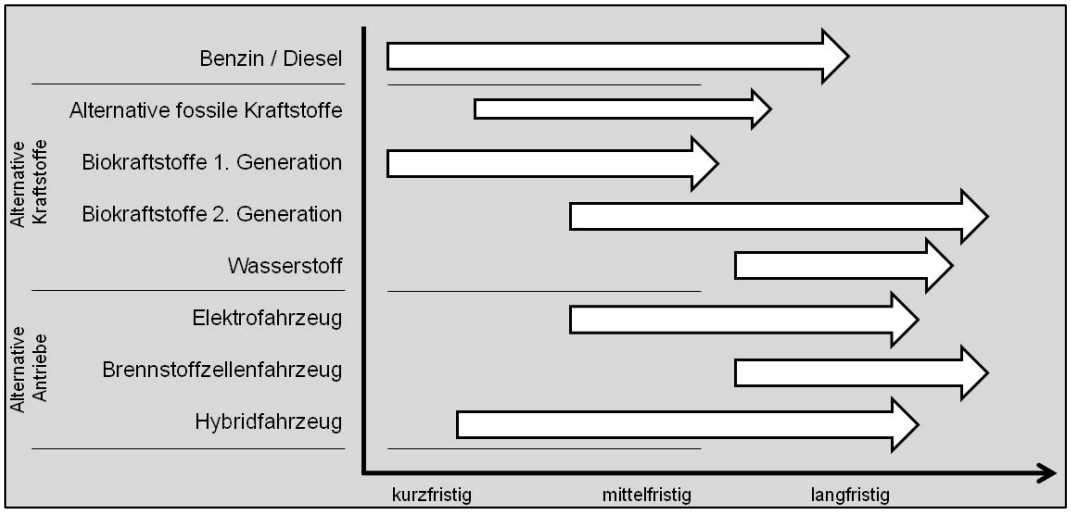


Quelle: EUCAR (2008a), S. 12

Laut Stan (2008) ist es anzunehmen, dass in der Zukunft der Konkurrenzkampf zwischen den zwei natürlichen Energieträgern, Alkohol und Wasserstoff, stattfin-

det[157]. Laut Puls (2006) kann man vermuten, dass die Argumente besonders für die Langfristigkeit von Wasserstoff sprechen. Da dieser in unbegrenzter Menge zur Verfügung steht, die Verwendung und die Bereitstellung ohne eine Belastung für die Umwelt erfolgen kann und nach einer Etablierung keine weiteren Alternativen notwendig werden[158]. Des Weiteren räumt Puls (2006) dem Elektrofahrzeug mit einer Batterie aufgrund der Elektroenergiespeicher keine Zukunftschancen ein.

Abbildung 40: Zeithorizont von alternativen Kraftstoffen und Antrieben



Quelle: Eigene Darstellung

Abschließend ist es anzunehmen, dass die konventionellen Kraftstoffe und Antriebe kurz- bis mittelfristig dominieren und langfristig zudem eine wichtige Stellung einnehmen werden (Abbildung 40). Die alternativen Kraftstoffe aus fossilen Rohstoffen bleiben auch zukünftig ein Nischenprodukt, tragen dennoch zur Diversifizierung bei. Die Biokraftstoffe der 1. Generation werden mittelfristig von den Biokraftstoffen der 2. Generation abgelöst, welche durch die höheren Hektarerträge und den kostengünstigeren Anbau an Bedeutung gewinnen werden. Die Anzahl der Hybrid- und Elektrofahrzeuge wird mittelfristig deutlich zunehmen, was durch die Verbesserung der Elektroenergiespeicher und die Verbreitung der Stromerzeugung aus regenerativen Quellen getragen wird. Der Wasserstoff als Kraftstoff und die Brennstoffzellenfahrzeuge können, neben Biokraftstoffen, langfristig die konventionellen Antriebe ablösen und die zukünftige Mobilität sichern.

[157] Vgl. Stan (2008), S. 218
[158] Vgl. Puls (2006), S. 81)

Anlagenverzeichnis

Anlage 1: Übersicht der Markteinführung von Fahrzeugen mit alternativen Antrieben 69
Anlage 2: Herstellkosten von Biokraftstoffen 70
Anlage 3: Vermeidungskosten von alternativen Antrieben 70
Anlage 4: WTW-Vergleich fossiler Kraftstoffe 71
Anlage 5: WTW-Vergleich alternativer Kraftstoffe - Dieselsubstitute 72
Anlage 6: WTW-Vergleich alternativer Kraftstoffe - Benzinsubstitute 73
Anlage 7: WTW-Vergleich alternativer Kraftstoffe - Wasserstoff und Biogas 74
Anlage 8: WTW-Vergleich alternativer Antriebe - Elektrofahrzeuge 75
Anlage 9: WTW-Vergleich alternativer Antriebe - Brennstoffzellenfahrzeuge 76
Anlage 10: WTW-Vergleich alternativer Antriebe - Hybridfahrzeuge 76
Anlage 11: Umweltvorteile und Umweltnachteile alternativer Kraftstoffe und Antriebe 77
Anlage 12: Eigenschaften von Biokraftstoffen im Vergleich 78

Anlage 1: Übersicht der Markteinführung von Fahrzeugen mit alternativen Antrieben

Marke / Modell	Antrieb	Markteinführung in Deutschland	Anmerkung
Audi A5 2.0 T-CNG	Erdgas (CNG)	unbekannt	
Audi Q5 Hybrid	Voll-Hybrid	2010/11	
Audi 4.2 FSI-V8-Hybrid	Voll-Hybrid	unbekannt	
BMW X6 Active Hybrid	Voll-Hybrid	Nobember 2009	
BMW 750i Active Hybrid	Mild-Hybrid	Nobember 2009	
BMW Hydrogen 7	Brennstoffzelle/Wasserstoff	unbekannt	Praxistest mit 100 Fahrzeugen läuft
Bolloré Blue-Car	Elektrofahrzeug	August 2009	Markteinführung zeitgleich in Europa, USA und Japan (Entwicklung mit Paninfarina)
Cadillac Converj	Plug-In-Hybrid	unbekannt	
Cadillac Escalade Hybrid	Voll-Hybrid	unbekannt	Markteinführung September 2009 in den USA
Chevrolet Volt	Plug-In-Hybrid	2010/11	Markteinführung in USA (als Opel Ampera baugleich in Europa)
Chrysler 200C EV	Elektrofahrzeug	unbekannt	voraussichtliche Markteinführung 2012
Citroën DS5 Hybrid	Serieller Hybrid	2011	Dieselmotor (Vorderachse), elektrische Radnabenmotoren (Hinterachse)
Dodge Circuit EV	Elektrofahrzeug	unbekannt	
Dura Car Quicc! Diva	Elektrofahrzeug	2010/11	Kleinserie bereits 2009
Fiat Panda Aria	Erdgas/Wasserstoff	unbekannt	Triebwerk vorbereitet für Betrieb mit Gemisch aus 70 Prozent Erdgas und 30 Prozent Wasserstoff
Fisker Karma Hybrid	Plug-In-Hybrid	Oktober 2009	
Ford Fusion Hybrid	Voll-Hybrid	unbekannt	Markteinführung Mai 2009 in den USA
Honda Insight Hybrid	Mild-Hybrid	April 2009	
Honda FCX-Clarity	Brennstoffzelle/Wasserstoff	unbekannt	Praxistest in Japan und USA läuft
Honda CR-Z Hybrid	Mild-Hybrid	2010	
Honda Jazz Hybrid	Mild-Hybrid	2010	
Hyundai i-Blue	Brennstoffzelle/Wasserstoff	unbekannt	
Kia Cee'd Hybrid	Mild-Hybrid	2010/11	
Kia Soul Hybrid	Mild-Hybrid	unbekannt	
Kia FCEV	Brennstoffzelle/Wasserstoff	unbekannt	
Lexus HS 250h	Voll-Hybrid	unbekannt	Markteinführung Juli 2009 in den USA
Lexus RX 450h	Voll-Hybrid	Mai 2009	
Mercedes S400 BlueHybrid	Mild-Hybrid	Juni 2009	
Mercedes ML 450 Hybrid	Voll-Hybrid	September 2009	
Mercedes E300 Bluetech Hybrid	Voll-Hybrid	2010/11	kombiniert mit Dieselmotor
Mercedes S300 Bluetech Hybrid	Voll-Hybrid	2010/11	kombiniert mit Dieselmotor
Mercedes F700	Mild-Hybrid	unbekannt	kombiniert mit DiesOtto-Motor (homogene Verbrennung)
Mercedes BlueZERO E-Cell	Elektrofahrzeug	2010/11	Kleinserie schon 2010
Mercedes BlueZERO E-Cell Plus	Voll-Hybrid	2010/11	Kleinserie 2010
Mercedes BlueZERO F-Cell	Brennstoffzelle/Wasserstoff	2010/11	Kleinserie 2010
MINDSET AG Mindset	Plug-In-Hybrid	2010/11	
Mini E	Elektrofahrzeug	unbekannt	Praxistest läuft: 50 Fahrzeuge in Berlin, 50 in London und 500 in Los Angeles
Mitsubishi i-Miev	Elektrofahrzeug	2010/11	Markteinführung in Japan 2009 geplant
Nissan EV	Elektrofahrzeug	2010/11	
Opel Ampera	Plug-In-Hybrid	2010/11	baugleich mit Chevrolet Volt
Opel Corsa Hybrid	Mild-Hybrid	unbekannt	kombiniert mit Dieselmotor
Pininfarina B0	Elektrofahrzeug	2010/11	
Peugeot Hybrid Hdi	Voll-Hybrid	2010/11	kombiniert mit Dieselmotor, Markteinführung in der Oberklasse ab 2011 geplant
Porsche Panamera Hybrid	Voll-Hybrid	2010/11	
Porsche Cayenne Hybrid	Voll-Hybrid	2010/11	
Renault Elektrofahrzeug	Elektrofahrzeug	2010/11	Markteinführung in Dänemark
Ronart Lightning GT	Elektrofahrzeug	Dezember 2009	vier Radnabenmotoren
Ruf eRuf Porsche 911	Elektrofahrzeug	2010	
Saab 9-3 Bioethanol-Hybrid	Voll-Hybrid und Bioethanol	unbekannt	
Seat Leon Twin-Drive Ecomotive	Plug-In-Hybrid	unbekannt	
Smart ED	Elektrofahrzeug	2010/11	Praxistest 2010: 100 Fahrzeuge in Berlin
Subaru R1e	Elektrofahrzeug	unbekannt	Praxistest in Japan läuft
Tesla-Motors Roadster	Elektrofahrzeug	März 2009	
Tesla-Motors Roadster Sport	Elektrofahrzeug	Juni 2009	
Think Think city	Elektrofahrzeug	unbekannt	Markteinführung in Norwegen bereits 2008, in Dänemark 2009
Toyota FT EV	Elektrofahrzeug	unbekannt	voraussichtliche Markteinführung 2012
Toyota Prius Hybrid	Voll-Hybrid	Juli 2009	dritte Hybrid-Generation
Toyota Prius PHV	Plug-In-Hybrid	Dezember 2009	
Toyota Camry Erdgas-Hybrid	Voll-Hybrid und Erdgas	unbekannt	
Volvo C30 ReCharge Concept	Plug-In-Hybrid	unbekannt	
VW Golf TDI Hybrid	Voll-Hybrid	2010/11	kombiniert mit Dieselmotor
VW Touareg V6 TSI Hybrid	Voll-Hybrid	2010/11	

Quelle: ADAC (2009b), S. 26-28

Anlage 2: Herstellkosten von Biokraftstoffen

	Herstellungskosten (Euro/l)	Kraftstoffäquivalente (Euro/l)	Herstellungskosten (Euro/GJ)
Biodiesel aus Raps	0,63	0,69	19,03
Rapsöl	0,49	0,51	14,17
Bioethanol			
Getreide	0,47	0,72	21,97
Zuckerrüben	0,57	0,88	27,00
Zuckerrohr (BRA)	0,22	0,34	10,39
Lignocellulose	0,64	0,98	30,00
BtL	1,00	1,03	29,90
Biomethan (Biogas)	1,04 *	0,74	20,83

* (Euro/kg)

Quelle: FNR (http://www.bio-kraftstoffe.info/uploads/pics/Abb39_rgb72_01.gif)

Anlage 3: Vermeidungskosten von alternativen Antrieben

Treibstoff / Antriebsart	THG-Einsparung in Millionen Tonnen CO_{2eq} pro Jahr	Vermeidungskosten in Euro pro Tonne CO_{2eq}
Konventionell / Hybrid	6	364
Erdgas (CNG) / Verbrennungsmotor	5	460
Gas to Liquid (GTL) / Verbrennungsmotor	-5	-
Biomass to Liquid (BTL) / Verbrennungsmotor	32	300
Bioethanol / Verbrennungsmotor	5-29	254-1.812
Biodiesel (RME) / Verbrennungsmotor	14-16	278-345
H_2 (Erdgasdampfreformation) / Verbrennungsmotor	-7	-
H_2 (Erdgasdampfreformation) / Brennstoffzelle	12	1.539
H_2 (Elektrolyse-Wind) / Verbrennungsmotor	33	746
H_2 (Elektrolyse-Wind) / Brennstoffzelle	35	714
H_2 (Elektrolyse-Erdgas) / Verbrennungsmotor	-45	-
H_2 (Elektrolyse-Erdgas) / Brennstoffzelle	-9	-

Quelle: Puls (2006), S. 91

Anlage 4: WTW-Vergleich fossiler Kraftstoffe

Krafstoff	Rohstoff	Bereitstellung	Antrieb	Energeiverbrauch			THG-Emissionen		
				WTT	TTW	**WTW**	WTT	TTW	**WTW**
Benzin	Erdöl	Erdölförderung, Schifftransport, Raffination, Landtransport	Ottomotor, konventionell	0,9	5,8	**6,7**	23	139	**162**
Diesel	Erdöl	Erdölförderung, Schifftransport, Raffination, Landtransport	Diesel, Direkteinspritzung	0,9	5,3	**6,2**	24	128	**152**
Erdgas (CNG)	Erdgas	Pipeline 1000 km, Kompression vor Ort	Ottomotor, konventionell	0,7	5,8	**6,5**	15	108	**123**
		Pipeline 4000 km, Kompression vor ort		1,1	5,8	**6,9**	26	108	**134**
		Pipeline 7000 km, Kompression vor ort		1,7	5,8	**7,5**	40	108	**148**
		Verflüssigung, Schifftransport, Straßentransport, Verdampfung, Kompression vor Ort		1,5	5,8	**7,3**	38	108	**146**
		Verflüssigung, Schifftransport, Verdampfung, Pipeline, Kompression vor Ort		1,8	5,8	**7,6**	37	108	**145**
		Verflüssigung, C-Abtrennung, Lagerung, Schifftransport, Verdampfung, Pipeline, Kompression vor Ort		1,9	5,8	**7,7**	30	108	**138**
Autogas (LPG)	Erdöl	Erdölförderung, Raffination (LPG), Schifftransport, Landtransport	Ottomotor, konventionell	0,7	5,9	**6,6**	15	126	**141**
Gas to Liquid (GTL)	Erdgas	Reformierung, Diesel-Synthese, Schifftransport, Landtransport	Diesel, Direkteinspritzung	3,7	5,3	**9,0**	43	124	**167**
Coal to Liquid (CTL)	Kohle	Zentrale Vergasung, Diesel-Synthese, Straßetransport	Diesel, Direkteinspritzung	5,2	5,3	**10,5**	222	124	**346**

Quelle: Optiresource (URL: http://www2.daimler.com/sustainability/optiresource/)

Anlage 5: WTW-Vergleich alternativer Kraftstoffe - Dieselsubstitute

Krafstoff	Rohstoff	Bereitstellung	Antrieb	Energeiverbrauch			THG-Emissionen		
				WTT	TTW	**WTW**	WTT	TTW	**WTW**
Diesel	Erdöl	Erdölförderung, Schifftransport, Raffination, Landtransport	Diesel, Direkteinspritzung	0,9	5,3	**6,2**	24	128	**152**
Biodiesel B100	Raps	Anbau/Ernte, Straße, Auspressen und Veresterung, Straße, Kuppelprodukt: Chemikalien		6,4	5,3	**11,7**	-50	133	**83**
		Anbau/Ernte, Straße, Auspressen und Veresterung, Straße, Kuppelprodukt: Tierfutter		6,7	5,3	**12,0**	-41	133	**92**
		Anbau/Ernte, Straße, Auspressen, Veresterung durch Bioethanol, Straße, Kuppelprodukt: Chemikalien		6,7	5,3	**12,0**	-55	133	**78**
		Anbau/Ernte, Straße, Auspressen, Veresterung durch Bioethanol, Straße, Kuppelprodukt: Tierfutter		7,0	5,3	**12,3**	-47	133	**86**
	Sonnenblume	Anbau/Ernte, Straße, Auspressen und Veresterung, Straße, Kuppelprodukt: Chemikalien		5,3	5,3	**10,6**	-87	133	**46**
		Anbau/Ernte, Straße, Auspressen und Veresterung, Straße, Kuppelprodukt: Tierfutter		5,6	5,3	**10,9**	-78	133	**55**
Biodiesel B5	Raps	Anbau/Ernte, Straße, Auspressen, Veresterung, Straße, Kuppelprodukt: Chemikalien		1,2	5,3	**6,5**	21	128	**149**
		Anbau/Ernte, Straße, Auspressen, Veresterung durch Bioethanol, Straße, Kuppelprodukt: Chemikalien		1,2	5,3	**6,5**	21	128	**149**
Biomass to Liquid (BTL)	Holz aus Kurz-umtriebsplantage	Anbau/Ernte, Straße, zentrale Vergasung, Diesel-Synthese, Straße		6,4	5,3	**11,7**	-110	124	**14**
	Restholz	Sammlung, Straße, zentrale Vergasung, Vergasung, Diesel-Synthese, Straße		6,4	5,3	**11,7**	-114	124	**10**
Dimethylether (DME)	Holz aus Kurz-umtriebsplantage	Anbau/Ernte, Straße, zentrale Vergasung, Diesel-Synthese, Straße		5,8	5,3	**11,1**	-104	118	**14**
	Restholz	Sammlung, Straße, zentrale Vergasung, Vergasung, Diesel-Synthese, Straße		5,8	5,3	**11,1**	-108	118	**10**

Quelle: Optiresource (URL: http://www2.daimler.com/sustainability/optiresource/)

Anlage 6: WTW-Vergleich alternativer Kraftstoffe - Benzinsubstitute

Krafstoff	Rohstoff	Bereitstellung	Antrieb	Energeiverbrauch			THG-Emissionen		
				WTT	TTW	**WTW**	WTT	TTW	**WTW**
Benzin	Erdöl	Erdölförderung, Schifftransport, Raffination, Landtransport	Ottomotor, konventionell	0,9	5,8	**6,7**	23	139	**162**
Bioethanol E100 1. Generation	Weizen	Anbau/Ernte, Straße, Fermentation, Destillation, Enegriequelle: herkömmlicher Kessel, Straße, Kuppelprodukt: Tierfutter		10,5	5,9	**16,4**	-23	137	**114**
		Anbau/Ernte, Straße, Fermentation, Destillation, Enegriequelle: kohlegefeuerter Kessel, Straße, Kuppelprodukt: Tierfutter		10,3	5,9	**16,2**	41	137	**178**
		Anbau/Ernte, Straße, Fermentation, Destillation, Enegriequelle: strohgefeuerter Kessel, Straße, Kuppelprodukt: Tierfutter		10,0	5,9	**15,9**	-88	137	**49**
		Anbau/Ernte, Straße, Fermentation, Destillation, Enegriequelle: Gasturbine, Straße, Kuppelprodukt: Tierfutter		9,0	5,9	**14,9**	-47	137	**90**
	Zuckerrübe	Anbau/Ernte, Straße, Fermentation, Destillation, Straße, Kuppelprodukt: Tierfutter		11,0	5,9	**16,9**	-26	137	**111**
		Anbau/Ernte, Straße, Fermentation, Destillation, Straße, Kuppelprodukt: Strom		7,7	5,9	**13,6**	-79	137	**58**
	Zuckerrohr	Anbau/Ernte, Fermentation, Destillation, Schifftransport, Straße		10,6	5,9	**16,5**	-115	137	**22**
Bioethanol E100 2. Generation	Weizenstroh	Sammlung, Straße, Fermentation, Destillation, Straße		7,8	5,9	**13,7**	-118	137	**19**
	Holz aus Kurz-umtriebsplantage	Anbau/Ernte, Straße, Hydrolyse, Fermentation, Destillation, Straße		11,5	5,9	**17,4**	-94	137	**43**
	Restholz	Sammlung, Straße, Hydrolyse, Fermentation, Destillation, Straße		11,5	5,9	**17,4**	-101	137	**36**
Bioethanol E5	Weizen	Anbau/Ernte, Straße, Fermentation, Destillation, Enegriequelle: herkömmlicher Kessel, Straße, Kuppelprodukt: Tierfutter		1,3	5,9	**7,2**	22	140	**162**
	Zuckerrübe	Anbau/Ernte, Straße, Fermentation, Destillation, Straße, Kuppelprodukt: Tierfutter		1,3	5,9	**7,2**	22	140	**162**
	Zuckerrohr	Anbau/Ernte, Fermentation, Destillation, Schifftransport, Straße		1,3	5,9	**7,2**	17	140	**157**
	Weizenstroh	Sammlung, Straße, Fermentation, Destillation, Straße		1,2	5,9	**7,1**	17	140	**157**
	Holz aus Kurz-umtriebsplantage	Anbau/Ernte, Straße, Hydrolyse, Fermentation, Destillation, Straße		1,4	5,9	**7,3**	18	140	**158**
	Restholz	Sammlung, Straße, Hydrolyse, Fermentation, Destillation, Straße		1,4	5,9	**7,3**	18	140	**158**

Quelle: Optiresource (URL: http://www2.daimler.com/sustainability/optiresource/)

Anlage 7: WTW-Vergleich alternativer Kraftstoffe - Wasserstoff und Biogas

Krafstoff	Rohstoff	Bereitstellung	Antrieb	Energeiverbrauch			THG-Emissionen		
				WTT	TTW	**WTW**	WTT	TTW	**WTW**
Benzin	Erdöl	Erdölförderung, Schifftransport, Raffination, Landtransport	Ottomotor, konventionell	0,9	5,8	**6,7**	23	139	**162**
Wasserstoff, Elektrolyse, gasförmig (CGH_2)	EU-Strommix zur Stromerzeugung	Stromerzeugung, Stromnetz, Elektrolyse und Kompression vor Ort		18,9	5,2	**24,1**	348,5	0,5	**349**
	Erdgas zur Stromerzeugung	Pipeline 4000 km, Stromerzeugung, Stromnetz, Elektrolyse und Kompression vor Ort		12,5	5,2	**17,7**	338,5	0,5	**339**
	Kohle zur Stromerzeugung	Stromerzeugung, Stromnetz, zentrale Elektrolyse, Pipeline, Kompression vor Ort		16,6	5,2	**21,8**	694,5	0,5	**695**
	Kernenergie zur Stromerzeugung	Stromerzeugung, Stromnetz, Elektrolyse und Kompression vor Ort		26,2	5,2	**31,4**	11,5	0,5	**12**
	Wasserkraft zur Stromerzeugung	Stromerzeugung, Stromnetz, zentrale Elektrolyse, Pipeline, Kompression vor Ort		4,1	5,2	**9,3**	15,5	0,5	**16**
	Sonnenenergie zur Stromerzeugung	Stromerzeugung, Stromnetz, Elektrolyse und Kompression vor Ort		3,3	5,2	**8,5**	0	0,5	**0,5**
	Windenergie zur Stromerzeugung	Stromerzeugung, Stromnetz, zentrale Elektrolyse, Pipeline, Kompression vor Ort		4,1	5,2	**9,3**	15,5	0,5	**16**
	Holz aus Kurz-umtriebsplantage zur Stromerzeugung	Anbau/Ernte, Stromerzeugung, Stromnetz, Elektrolyse und Kompression vor Ort		23,0	5,2	**28,2**	51,5	0,5	**52**
Wasserstoff, Reformation, gasförmig (CGH_2)	Erdgas	Pipeline 4000 km, Reformierung und Kompression vor Ort		5,0	5,2	**10,2**	185,5	0,5	**186**
		Pipeline 7000 km, zentrale Reformierung, Pipeline, Kompression vor Ort		4,5	5,2	**9,7**	181,5	0,5	**182**
	Kohle	Zentrale Vergasung, Reformierung, Pipeline, Kompression vor Ort		7,3	5,2	**12,5**	390,5	0,5	**391**
	Restholz	Sammlung, Straße, zentrale Vergasung, Reformierung, Pipeline, Kompression vor Ort		5,1	5,2	**10,3**	20,5	0,5	**21**
	Holz aus Kurz-umtriebsplantage	Anbau/Ernte, Straße, zentrale Vergasung, Reformierung, Pipeline, Kompression vor Ort		5,1	5,2	**10,3**	23,5	0,5	**24**
Wasserstoff, Elektrolyse, flüssig (LH_2)	EU-Strommix zur Stromerzeugung	Stromerzeugung, Stromnetz, zentrale Elektrolyse und Verflüssigung, Straße		22,0	5,2	**27,2**	395,5	0,5	**396**
	Kohle zur Stromerzeugung	Stromerzeugung, Stromnetz, zentrale Elektrolyse und Verflüssigung, Straße		19,4	5,2	**24,6**	794,5	0,5	**795**
Wasserstoff, Reformation, flüssig (LH_2)	Erdgas	Pipeline 7000 km, zentrale Reformierung und Verflüssigung, Straße		6,9	5,2	**12,1**	235,5	0,5	**236**
	Holz aus Kurz-umtriebsplantage	Anbau/Ernte, Straße, zentrale Vergasung, Reformierung und Verflüssigung, Straße		7,8	5,2	**13,0**	13,5	0,5	**14**
Biogas	Organische Abfälle (Biomüll)	Sammlung, Fermentation, Pipeline, Kompression vor Ort		5,1	5,8	**10,9**	-76	108	**32**
	Mist	Sammlung, Fermentation, Pipeline, Kompression vor Ort		5,5	5,8	**11,3**	-103,5	108	**4,5**
	Güle	Sammlung, Fermentation, Pipeline, Kompression vor Ort		5,6	5,8	**11,4**	-251	108	**-143**

Quelle: Optiresource (URL: http://www2.daimler.com/sustainability/optiresource/)

Anlage 8: WTW-Vergleich alternativer Antriebe - Elektrofahrzeuge

Antrieb	Rohstoff zur Stromerzeugung	Stromerzeugung	Energeiverbrauch			THG-Emissionen		
			WTT	TTW	**WTW**	WTT	TTW	**WTW**
Elektrofahrzeug mit Nickel-Metallhybrid-Batterie	EU-Mix	Stromerzeugung, Stromnetz	8,2	4,3	**12,5**	181	0	**181**
	Erdgas	Pipeline 7000 km, Stromerzeugugn, Stromnetz	5,7	4,3	**10**	196	0	**196**
	Kohle	Stromerzeugung (Dampfturbine), Stromnetz	7	4,3	**11,3**	374	0	**374**
	Kernkraft	Stromerzeugung, Stromnetz	12	4,3	**16,3**	6,1	0	**6,1**
	Sonne/Wind	Stromerzeugung, Stromnetz	0	4,3	**4,3**	0	0	**0**
	Wasser	Stromerzeugung (Wasserturbine), Stromnetz	0,2	4,3	**4,5**	0	0	**0**
	Restholz	Sammlung, Straße, Zellstofffabrik, Vergasung,	0,8	4,3	**5,1**	0,5	0	**0,5**
	Gülle	Sammlung, Fermentation, Stromerzeugung vor Ort,	13,4	4,3	**17,7**	-241	0	**-241**
Elektrofahrzeug mit Lithium-Ionen-Batterie	EU-Mix	Stromerzeugung, Stromnetz	3,9	2,1	**6**	87	0	**87**
	Erdgas	Pipeline 7000 km, Stromerzeugugn, Stromnetz	2,8	2,1	**4,9**	95	0	**95**
	Kohle	Stromerzeugung (Dampfturbine), Stromnetz	3,3	2,1	**5,4**	181	0	**181**
	Kernkraft	Stromerzeugung, Stromnetz	5,8	2,1	**7,9**	2,9	0	**2,9**
	Sonne/Wind	Stromerzeugung, Stromnetz	0	2,1	**2,1**	0	0	**0**
	Wasser	Stromerzeugung (Wasserturbine), Stromnetz	0,1	2,1	**2,2**	0	0	**0**
	Restholz	Sammlung, Straße, Zellstofffabrik, Vergasung,	0,4	2,1	**2,5**	0,3	0	**0,3**
	Gülle	Sammlung, Fermentation, Stromerzeugung vor Ort,	6,4	2,1	**8,5**	-117	0	**-117**

Quelle: Optiresource (URL: http://www2.daimler.com/sustainability/optiresource/)

Anlage 9: WTW-Vergleich alternativer Antriebe - Brennstoffzellenfahrzeuge

Antrieb	Rohstoff	Bereitstellung	Energeiverbrauch			THG-Emissionen		
			WTT	TTW	**WTW**	WTT	TTW	**WTW**
Brennstoffzellenfahrzeug, gasförmiger Wasserstoff, Elektrolyse	EU-Strommix zur Stromerzeugung	Stromerzeugung, Stromnetz, Elektrolyse und Kompression vor Ort	10,6	2,9	**13,5**	196	0	**196**
	Erdgas zur Stromerzeugung	Pipeline 4000 km, Stromerzeugung, Stromnetz, Elektrolyse und Kompression vor Ort	7	2,9	**9,9**	190	0	**190**
	Kohle zur Stromerzeugung	Stromerzeugung, Stromnetz, zentrale Elektrolyse, Pipeline, Kompression vor Ort	9,3	2,9	**12,2**	389	0	**389**
	Sonnenenergie zur Stromerzeugung	Stromerzeugung, Stromnetz, Elektrolyse und Kompression vor Ort	1,9	2,9	**4,8**	0	0	**0**
	Windenergie zur Stromerzeugung	Stromerzeugung, Stromnetz, zentrale Elektrolyse, Pipeline, Kompression vor Ort	2,3	2,9	**5,2**	8,5	0	**8,5**
	Holz aus Kurz-umtriebsplantage zur Stromerzeugung	Anbau/Ernte, Stromerzeugung, Stromnetz, Elektrolyse und Kompression vor Ort	12,9	2,9	**15,8**	29	0	**29**
Brennstoffzellenfahrzeug, gasförmiger Wasserstoff, Reformation	Erdgas	Pipeline 4000 km, Reformierung und Kompression vor Ort	2,8	2,9	**5,7**	104	0	**104**
	Kohle	Zentrale Vergasung, Reformierung, Pipeline, Kompression vor Ort	4,1	2,9	**7**	219	0	**219**
	Holz aus Kurz-umtriebsplantage	Anbau/Ernte, Straße, zentrale Vergasung, Reformierung, Pipeline, Kompression vor Ort	2,9	2,9	**5,8**	13	0	**13**
Brennstoffzellenfahrzeug, flüssiger Wasserstoff Elektrolyse	EU-Strommix zur Stromerzeugung	Stromerzeugung, Stromnetz, zentrale Elektrolyse und Verflüssigung, Straße	12,4	2,9	**15,3**	222	0	**222**
	Kohle zur Stromerzeugung	Stromerzeugung, Stromnetz, zentrale Elektrolyse und Verflüssigung, Straße	10,9	2,9	**13,8**	446	0	**446**
Brennstoffzellenfahrzeug, flüssiger Wasserstoff Reformation	Erdgas	Pipeline 7000 km, zentrale Reformierung und Verflüssigung, Straße	3,9	2,9	**6,8**	132	0	**132**
	Holz aus Kurz-umtriebsplantage	Anbau/Ernte, Straße, zentrale Vergasung, Reformierung und Verflüssigung, Straße	4,4	2,9	**7,3**	7,6	0	**7,6**

Quelle: Optiresource (URL: http://www2.daimler.com/sustainability/optiresource/)

Anlage 10: WTW-Vergleich alternativer Antriebe - Hybridfahrzeuge

Krafstoff	Rohstoff	Bereitstellung	Antrieb	Energeiverbrauch			THG-Emissionen		
				WTT	TTW	**WTW**	WTT	TTW	**WTW**
Benzin	Erdöl	Erdölförderung, Schifftransport, Raffination, Landtransport	Ottomotor, konventionell	0,9	5,8	**6,7**	23	139	**162**
Diesel	Erdöl	Erdölförderung, Schifftransport, Raffination, Landtransport	Dieselmotor, Direkteinspritzung	0,9	5,3	**6,2**	24	128	**152**
Benzin, elektrischer Strom	Erdöl	Erdölförderung, Schifftransport, Raffination, Landtransport	Ottomotor, Voll-Hybrid	0,7	5,0	**5,7**	30	81	**111**
Diesel, elektrischer Strom	Erdöl	Erdölförderung, Schifftransport, Raffination, Landtransport	Dieselmotor, Voll-Hybrid	0,7	4,4	**5,1**	20	105	**125**

Quelle: Optiresource (URL: http://www2.daimler.com/sustainability/optiresource/)

Anlage 11: Umweltvorteile und Umweltnachteile alternativer Kraftstoffe und Antriebe

Kraftstoffe/Antriebe	Umweltvorteile	Umweltnachteile	Bemerkungen
Biokraftstoffe - Ethanol - Rapsöl/Rapsöl-methylester	CO_2-Vorteil im Vergleich zu Diesel; biologische Abbaubarkeit	Grundwasser-, Bodenbelastung und hoher Flächenverbrauch für Anbau; N_2O-Emissionen durch hohen Düngemittelbedarf	Emissionen zu Diesel unverändert; unwirtschaftlich; hohe Subentionen für Landwirtschaft und durch Mineralölsteuerausfall
Erdgas - komprimiert (CNG) - verflüssigt (LNG)	niedrigste Emissionen; 25% geringere CO_2-Emission pro Energieeinheit im Vergleich zu Benzin und Diesel	Schwere Speicher erhöhen das Fahrzeuggewicht	Infrastruktur entsteht; reduzierte Reichweite; für Flotten sinnvoll; alle Sicherheitsstan-dards sind erfüllt
Flüssiggas (LPG)	niedrige Emissionen; 10-16% geringere CO_2-Emission pro Energieeinheit als Otto-, Dieselkraftstoff	Schwere Speicher erhöhen das Fahrzeuggewicht	Vergleichbar mit Erdgas, mit Vorteilen bei Tankstelle, Speicher, Reichweite, Handling;
Wasserstoff (H_2)	keine Schadstoffemissionen außer NO_x am Ort der Verbrennung	Emissionen bei Erzeugung aus fossiler Energie; immer hohe Herstellungsverluste	aufwendige Speicher; unwirtschaftlich; besonders wenn solar erzeugt, ist direkte Nutzung der Solarenergie vorzuziehen
Elektrizität	nahezu keine lokalen Emission am Ort der Verwendung; geräuscharm	Emissionsverlagerung zum Kraftwerk; Batteriefragen (Recycling, Herstellung); sehr hohes Fahrzeuggewicht	unwirtschaftlich; stark eingeschränkte Einsatzgebiete (Schutzgebiete); keine flächendeckende Emissionsentlastung
Brennstoffzellen (BZ)	fast keine Emissionen am Ort der Verwendung; katalytische Brennstoffausnutzung; hoher Wirkungsgrad; niedrige Temperaturen	zusätzliche Verluste bei Zusatzaggregaten der BZ; hohe Anforderungen an H_2-Reinheit	Entwicklungsstand in Grundlagenforschung und Versuchsträger; Einsatz frühestens in 10-20 Jahren; BZ in Stationäranlagen vorzuziehen

Quelle: Umweltbundesamt (http://www.umweltdaten.de/verkehr/downloads/aerltant.pdf)

Anlage 12: Eigenschaften von Biokraftstoffen im Vergleich

	Biodiese aus Rapsöl	Biodiesel aus Palmöl	Biodiesel aus Sojaöl	Biodiesel aus tierischen Fetten	Biodiesel aus Jatropha	Reines Pflanzenöl (Rapsöl)	Biomass to Liquid (BTL)	Bioethanol aus Getreide	Bioethanol aus Zuckerrüben	Bioethanol aus Zuckerrohr (BRA)	Bioethanol aus Mais (USA)	Bioethanol aus Zellulose (Stroh)	Bioethanol aus zellulosehaltigen Restströmen	Biogas (Biomethan)	Bio-Wasserstoff
Kraftstoffäquivalente	0,91	0,90	0,90	0,91	0,92	0,96	0,97	0,65	0,65	0,65	0,65	0,65	0,65	1,40	3,51
Heizwert (MJ/l)	32,65	32,36	32,36	32,68	32,90	34,59	33,45	21,17	21,17	21,17	21,17	21,17	21,17	50,00	120
Biomasse (t/ha)	3,5	20,0	2,9	n.a.	2,5	3,5	15,0	7,0	58,0	73,0	9,0	3,0	1,0	45,0	15,0
Biokraftstoff (l/t Biomasse)	455	222	222	n.a.	244	440	269	387	108	88	400	342	371	79	90
Biokraftstoff (l/ha)	1592	4440	637	n.a.	610	1539	4028	2531	6252	6381	3740	985	223	3555	1350
l Kraftstoffäquivalente/ha	1445	3997	573	n.a.	559	1481	3907	1651	4079	4163	2440	640	145	4977	4739
Kraftstoffertrag (GJ/ha)	52	144	21	n.a.	20	53	135	55	132	135	79	21	5	178	162
GJ/ha (netto)	38	75	20	n.a.	k.A	35	114	52	120	116	40	18	k.A.	130	120
€/l Biokraftstoff	0,78	0,63	0,70	0,79	0,39	0,70	1,05	0,55	0,53	0,20	0,34	0,64	0,67	1,05	4,44
€/l Kraftstoffäqivalente	0,86	0,70	0,78	0,87	0,43	0,73	1,05	0,84	0,81	0,31	0,52	0,98	1,03	0,75	1,26
€/MJ	0,02	0,02	0,02	0,02	0,01	0,02	0,03	0,03	0,03	0,01	0,02	0,03	0,03	0,02	0,04
€/GJ	25	19	22	24	12	20	31	26	25	9	16	30	32	21,06	37
Kostendifferenz (energetisch) Biokraftstoffe - fossil (€)	0,45	0,29	0,37	0,46	k.A	0,32	0,67	0,46	0,43	-0,07	0,14	0,60	0,65	0,36	0,97
Einsparung kg CO2/l Biokraftstoff	1,9	2,0	1,6	2,6	k.A	1,9	2,5	1,5	1,5	1,6	0,5	1,6	1,9	2,1	k.A.
Einsparung kg CO2/l Kraftstoffäquivalente	2,1	2,2	1,8	2,9	k.A	2,0	2,6	2,2	2,3	2,5	0,8	2,4	2,9	1,5	k.A.
Einsparung t CO2/ha	3,0	8,9	1,0	n.a.	k.A	3,0	10,2	3,7	9,4	10,2	1,9	1,5	0,4	7,4	k.A.
€/t CO2	214	131	205	159	k.A	159	258	208	187	-30	182	248	227	240	k.A.
Marktanteil (% am relevanten Kraftstoffmarkt in D)	7	< 1	< 2	< 1	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Quelle: FNR (2009), S. 124-128

Literaturverzeichnis

Agentur für Erneuerbare Energien e. V. (2008). *Deutschlands Informationsportal zu Erneuerbaren Energien*. Abgerufen am 20. August 2009 von http://www.unendlich-viel-energie.de/

Agentur für Erneuerbare Energien e. V. (2009). *Globale Bioenergienutzung - Potenziale und Nutzungspfade.* Berlin: Agentur für Erneuerbare Energien.

Allgemeiner Deutscher Automobil-Club e. V.; ADAC. (2009). *ADAC Online.* Abgerufen am 22. Juli 2009 von http://www.adac.de/

Allgemeiner Deutscher Automobil-Club e. V.; ADAC. (Februar 2009a). E10-Kraftstoff kommt 2010. *ADAC Motorwelt* , S. 18.

Allgemeiner Deutscher Automobil-Club e. V.; ADAC. (März 2009b). Gas geben für die Zukunft. *ADAC Motorwelt* , S. 26-28.

Basshuysen, R. v., & Schäfer, F. (2007). *Handbuch Verbrennungsmotor, Grundlagen, Komponenten, Systeme, Perspektiven; 4. aktualisierte und erweiterte Auflage.* Wiesbaden: Friedr. Vieweg & Sohn Verlag | GWV Fachverlage GmbH.

Better Place. (2009). *Better Place.* Abgerufen am 16. August 2009 von http://www.betterplace.com/

Bloch, A. (7. Mai 2009). Watt geht ab? *Auto Motor und Sport* , S. 116-120.

BP. (2009). *BP Statistical Review of World Energy, June 2009.* London: BP.

Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe; BGR. (2006). *Trends der Angebots- und Nachfragesituation bei mineralischen Rohstoffen.* Hannover: BGR.

Bundesministerium für Verbraucherschutz, Ernährung und Landwirtschaft; BMELV. (2005). *Biokraftstoffe - Strategie für Mobilität von morgen.* Berlin: BMVEL.

Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung; BMVBS. (2004). *Bericht der Unterarbeitsgruppe Kraftstoffmatrix zum Matrixprozess.* Berlin: BMVBS.

Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie; BMWi. (2008). *Mobilität und Verkehrstechnologien, das 3. Verkehrsforschungsprogramm der Bundesregierung.* Berlin: BMWi, Öffentlichkeitsarbeit.

Deutsche BP AG. (2009). *BP Biokraftstoffe*. Abgerufen am 28. Juli 2009 von http://www.deutschebp.de/

Deutsche Shell Holding GmbH. (2009). *Shell in Deutschland*. Abgerufen am 31. Juli 2009 von http://www.shell.de/

Deutscher Verband Flüssiggas e. V. (2009). *Autogas*. Abgerufen am 24. Juli 2009 von http://www.autogastanken.de/

Deutsches Institut für Wirtschaftsforschung; DIW. (2008). *Erdgas im Tank für eine schadstoffarme Zukunft, Wochenbericht des DIW Nr. 50/2008.* Berlin: DIW.

E.ON Energie AG. (2009). *Elektroautos als Energiespeicher*. Abgerufen am 16. August 2009 von E.ON Energie: http://www.eon-energie.com/pages/eea_de/Innovation/Innovation/Perspektive_Kunde/Elektroautos_als_Energiespeicher/index.htm

Energtek Inc. (2008). *Energtek Inc. - Solutions*. Abgerufen am 21. Juli 2009 von http://www.energtek.com/solutions

Engel, T. (November 2005). *Das Elektrofahrzeug als Regelenergiekraftwerk des Solarzeitalters.* Abgerufen am 16. August 2009 von Deutsche Gesellschaft für Sonnenenergie e. V.: http://www.dgs.de/fileadmin/files/FASM/Engel-V2G-Regelenergiekraftwerk.pdf

European Automobile Manufacturers Association; ACEA. (2009). *European Automobile Industry Report.* Brüssel: ACEA.

European Council for Automotive R&D; EUCAR. (2008b). *Automotive and Transport R&D 2008-2009.* Brüssel: EUCAR.

European Council for Automotive R&D; EUCAR. (2008a). *The Automotive Industry R&D Challenges of the Future.* Brüssel: EUCAR.

Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V.; FNR. (2009). *Biokraftstoffe - Eine vergleichende Analyse.* Gülzow: FNR.

Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V.; FNR. (2009). *Biokraftstoffe*. Abgerufen am 29. Juli 2009 von http://www.bio-kraftstoffe.info/

Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V.; FNR. (2008). *Biokraftstoffe Basisdaten Deutschland.* Gülzow: FNR.

Forschungsvereinigung Verbrannungskraftmaschinen e. V.; FVV. (2004). *CO2-Studie, CO2-neutrale Wege zukünftiger Mobilität durch Biokraftstoffe.* Frankfurt: FVV.

GM Europe; Opel. (2009). *Opel Ampera: Re-Think Mobility!* Abgerufen am 14. August 2009 von http://www.opel-ampera.com/

Gross, U. (2008). *Prognose des Absatzmarktes für alternative Antriebe, Modellbildung und Simulation.* Saarbrücken: VDM Verlag Dr. Müller.

Institut der deutschen Wirtschaft Köln e. V. (2009). *Elektromobilität, Vision Elektroauto*. Abgerufen am 12. August 2009 von http://www.iwkoeln.de/

Kahmann, J., Wilhelm, L., & Törkel, B. (2006). *Beschäftigung durch gesellschaftlichen, demografischen und ökonomischen Wandel: Schwerpunktthema Mobilität und Logistik.* Stuttgart: ver.di - Vereinte Dienstleistungsgewerkschaft.

Kraftfahrt-Bundesamt; KBA. (2009a). *Fahrzeugzulassungen - Bestand, Emissionen, Kraftstoffe, 1. Januar 2009.* Flensburg: KBA.

Kraftfahrt-Bundesamt; KBA. (2009b). *Fahrzeugzulassungen - Neuzulassungen, Emissionen, Kraftstoffe, Jahr 2008.* Flensburg: KBA.

Kroher, T. (Februar 2009). Mit Strom aufwärts. *ADAC Motorwelt* , S. 32-34.

Landesbildungsserver Baden-Württemberg. (2009). *Bau und Funktion eines Verbrennungsmotors.* Abgerufen am 14. Juli 2009 von Landesbildungsserver Baden-Württemberg: http://www.schule-bw.de

Maibach, M; u.a. (2008). *Handbook on estimation of external costs in the transport sector, Version 1.1.* Delft: European Commission.

Mauritz, J. (18. Mai 2009). *Toyota Prius - die dritte Generation*. Abgerufen am 14. August 2009 von Automobil Industrie: http://www.automobil-industrie.vogel.de/

MCT Diana Koll KG. (2008). *Erdgasfahrzeuge - Tankstellen, Wirtschaftlichkeit, aktuelle Informationen*. Abgerufen am 22. Juli 2009 von http://www.erdgasfahrzeuge.de/

Optiresource Foundation. (2009). *Optiresource: Well-to-Wheel Betrachtung der Energieeffizienz von Pkw-Antireben*. Abgerufen am 20. August 2009 von http://www2.daimler.com/sustainability/optiresource/index.html

Organization of the Petroleum Exporting Countries; OPEC. (2008). *World Oil Outlook 2008.* Wien: OPEC.

Plouchart, G. (2004). *Energy Consumption in the Transport Sector.* Rueil-Malmaison: IFP.

Puls, T. (2006). *Alternative Antriebe und Kraftstoffe.* Köln: Deutscher Instituts-Verlag.

Rammler, S. (2003). *Anmerkungen zur Soziologie des Automobils.* Berlin: Technische Universität Berlin.

Robelius, F. (2007). *Giant Oil Fields - The Highway to Oil.* Uppsala: Uppsala University.

Rudschies, W. (Dezember 2008). Teil 3 Wasserstoff - Der Stoff, aus dem die Träume sind. *ADAC Motorwelt* , S. 31-35.

Schindler, J., & Zittel, W. (2008). *Zukunft der weltweiten Erdölversorgung, überarbeitete, deutschsprachige Ausgabe, Mai 2008.* Berlin: Energy Watch Group / Ludwig-Bölkow-Stiftung.

Schmidt, E. (03. März 2009). *Der Weg zum Elektroauto - Fachartikel.* Abgerufen am 16. August 2009 von Kfz-Betrieb Online: http://www.kfz-betrieb.vogel.de/firmendatenbank/antrieb/articles/192098/

Schuh, H. (20. Mai 2009). *Elektroautos: Batterie auf Rädern*. Abgerufen am 16. August 2009 von Zeit Online: http://www.zeit.de/2009/22/U-Elektromobilitaet

Shell International BV. (2008). *Shell energy scenarios.* Den Haag: Shell.

Stan, C. (2008). *Alternative Antriebe für Automobile, 2. erweiterte Auflage.* Berlin Heidelberg: Springer-Verlag.

Statistische Amt der Europäischen Gemeinschaften; EUROSTAT. (2008). *Europa in Zahlen - Eurostat Jahrbuch 2008.* Luxemburg: EUROSTAT.

Statistisches Bundesamt; DESTATIS. (2007). *Nachhaltige Entwicklung in Deutschland, Indikatorenbericht 2006.* Wiesbaden: Statistisches Bundesamt.

TOTAL Deutschland GmbH. (2008). *Zahlen, Daten, Fakten 2008.* Berlin: TOTAL Deutschland GmbH.

Toyota Motor Corporation. (2009). *Hybrid Synergy Drive*. Abgerufen am 14. August 2009 von http://www.hybridsynergydrive.com/

Umweltbundesamt. (2009). *Alternative Kraftstoffe und Fahrzeugantriebe.* Abgerufen am 20. August 2009 von http://www.umweltdaten.de/

Umweltbundesamt. (2006). *Entwicklung einer Gesamtstrategie zur Einführung alternativer Kraftstoffe, insbesondere regenerativ erzeugten Wasserstoffs.* Dessau-Roßlau: Umweltbundesamt.

Verband der Automobilindustrie e. V.; VDA. (2005). *Antriebe und Kraftstoffe der Zukunft - Die Strategie der deutschen Automobilindustrie.* Frankfurt a. M.: VDA.

Verband der Automobilindustrie e. V.; VDA. (2008). *Jahresbericht 2008.* Frankfurt a. M.: VDA.

Verband der Deutschen Biokrafstoffindustrie e. V.; VDB. (2009). *Biokraftstoffverband.* Abgerufen am 29. Juli 2009 von http://www.biokraftstoffverband.de/

World Business Council for Sustainable Development; WBCSD. (2004). *Mobilität 2030: Die Herausforderungen der Nachhaltigkeit meistern.* Genf: World Business Council for Sustainable Development.

„Suche nicht nach Fehlern, suche nach Lösungen.“

Henry Ford (1863-1947)