



GREENGEAR

Das Auto der Zukunft – Alternative Kraftstoffe und Antriebe



Alternative Antriebe

Gegenüberstellung, Wirtschaftlichkeit und Energieeffizienz

Michael Rau
Diplomarbeit

Michael Rau

Matrikel-Nr. 



Abgabedatum: 01.09.2009


Alternative Antriebe:

Gegenüberstellung, Wirtschaftlichkeit und Energieeffizienz

Diplomarbeit

vorgelegt zur Erlangung des Diplomabschlusses der Hochschule Pforzheim

Betreuer:

Prof. Dr. 

Zweitkorrektor:

Prof. Dipl.-Ing. 

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)

www.GreenGear.de

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: Kraftstoffenergieertrag aus Algen im Vergleich zu ausgewählten Ausgangsstoffen.....	35
Abbildung 24: Wege der Wasserstoffbereitstellung.....	36
Abbildung 25: CO ₂ -Emissionen der Herstellung von flüssigem (LH ₂) und gasförmigem Wasserstoff (GH 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 Antriebe.....	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.....	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 ₃ OH	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 ₂ O	Wasser
KBA	Kraftfahrtbundesamt

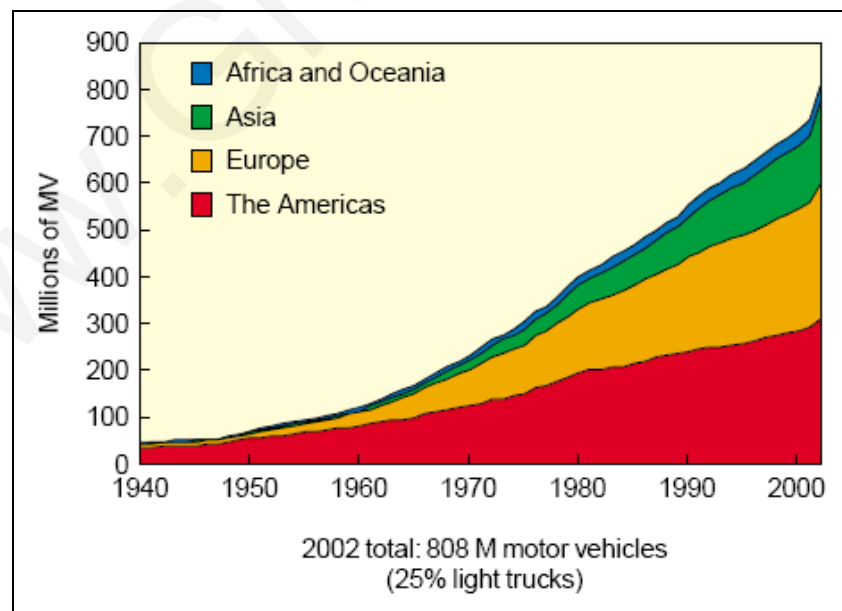
kg	Kilogramm
kW	Kilowatt
kWh/kg	Kilowattstunde pro Kilogramm
kWh/l	Kilowattstunde pro Liter
LH ₂	Liquid Hydrogen
LNG	Liquefied Natural Gas
LPG	Liquefied Petroleum Gas
Mbpd	Million Barrels per Day
Mio.	Million
MPa	Megapascal
Mrd.	Milliarde
MV	Motor Vehicle
m ³	Kubikmeter
NO _x	Stickoxide
O ₂	Sauerstoff
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 Entwicklungsländern¹. 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 beziffert².

Abbildung 1: Weltweite Entwicklung des Bestandes der Kraftfahrzeuge



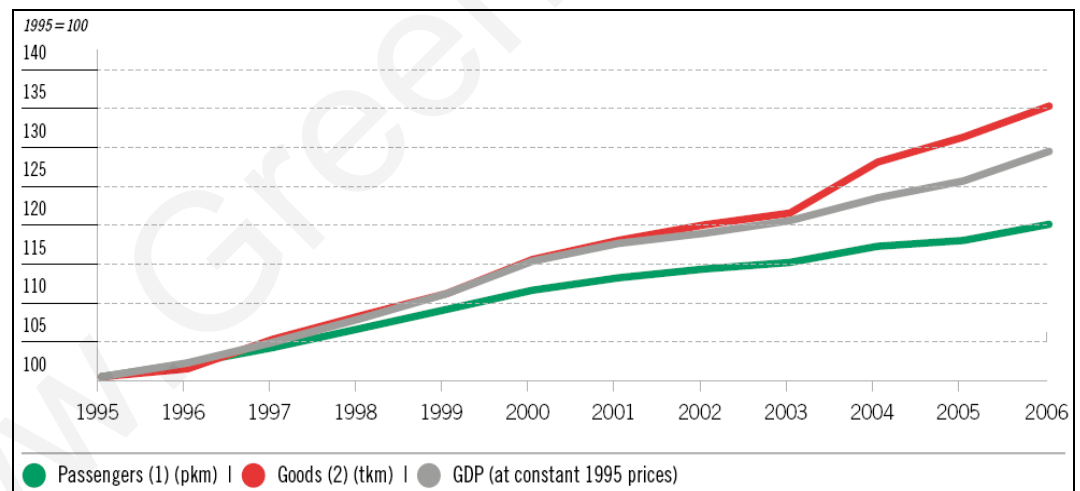
Quelle: IFP (2004), S. 2

¹ Vgl. Rammner (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 Beschäftigungsgrad³. 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 Leben⁴. Die preiswerte, uneingeschränkte, ausreichende und zugängliche individuelle Mobilität ist somit eine Voraussetzung auch für den zukünftigen Wohlstand einer Volkswirtschaft⁵.

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 Dieselfverfahren mit dem Einsatz von Benzin- und Dieselmotoren zu verstehen.