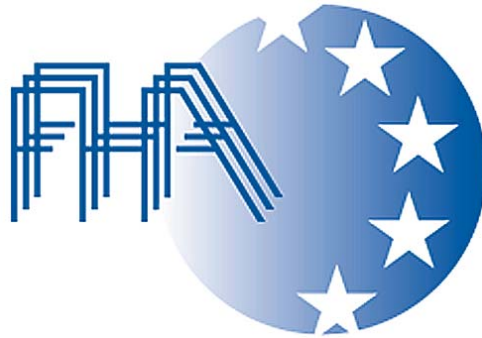


Projekt M7



Abschlussbericht

Thema:

Recherche zur PKW-Brennstoffzelle

Zeitraum:

21.03.2002 – 13.06.2002

Aufgabensteller:

Prof. Dr. Wieler

Bearbeiter:

**Manfred Fücksle
Jochen Ritter**

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	1
1. Einleitung	3
2. Funktionsweise und Aufbau einer Brennstoffzelle	4
3. Die verschiedenen Brennstoffzellentypen.....	5
3.1 Die Niedrigtemperatur-Brennstoffzellen.....	5
3.2 Mitteltemperatur-Brennstoffzellen	6
3.3 Hochtemperatur-Brennstoffzellen	6
3.4 Fazit	7
4. Treibstoffe.....	8
4.1 Erdgas	8
4.2 Spalt- und Synthesegas	8
4.3 Biogas.....	8
4.4 Kohle.....	8
4.5 Methanol	8
4.6 Benzin- und Dieselkraftstoffe.....	9
4.7 Dimethylether	9
4.8 Wasserstoff.....	9
5. Emissionen	10
5.1 Treibhauseffekt	10
5.2 Ozonabbau	11
5.3 Kanzerogenität	11
5.4 Versauerung	12
5.5 Ressourcenverbrauch.....	12
5.6 Energieverbrauch	13
6. Antriebskonzepte	14
6.1 Energieträger.....	14
6.1.1 Benzin/Diesel:.....	14
6.1.2 Erdgas.....	15
6.1.3 Rapsölmethylester RME und Dimethylether DME.....	15
6.1.4 Wasserstoff	16
6.1.5 Methanol.....	16
6.2 Energiewandlung	17
7. Fahrzeugkonzepte-PKW.....	21
7.1 GM/Opel.....	21
7.2 DaimlerChrysler	22
7.3 Ford.....	25
7.4 BMW	26
7.5 Toyota.....	27
7.6 Honda	27
7.7 Mazda	28
7.8 Volkswagen	28
8. Fahrzeugkonzepte-Busse.....	29
8.1 Nebus (Daimler-Chrysler).....	29
8.2 Citaro (Daimler-Chrysler)	29
8.3 MAN Niederflrbus:	29
8.4 Neoplan 8008 FC:	30
9. Wirkungsgrade	31
Literaturverzeichnis	33

1. Einleitung

Sie ist über 160 Jahre alt und aktueller denn je – die von dem Waliser Sir William Robert Grove entdeckte Technik mit Wasserstoff und Sauerstoff in einer elektrochemischen Zelle Strom zu erzeugen. Der Rechtsanwalt, Richter in London und Professor der Physik beschrieb schon 1839 – und demnach 37 Jahre vor der Erfindung des Verbrennungsmotors durch Nikolaus August Otto – eine galvanische Gasbatterie.

Einer der ersten Wissenschaftler, der die Bedeutung dieser Entdeckung, der direkten Umwandlung von chemischer in elektrische Energie erahnte, war Wilhelm Oswald, der seit 1887 Direktor des ersten Lehrstuhls für physikalische Chemie in Leipzig war. Er schrieb im Jahre 1894 über die „wissenschaftliche Elektrochemie der Gegenwart und ...der Zukunft“ folgendes: „Haben wir ein galvanisches Element, welches aus Kohle und dem Sauerstoff der Luft unmittelbar elektrische Energie liefert...., dann stehen wir vor einer technischen Umwälzung, gegen welche die bei der Erfindung der Dampfmaschine verschwinden muss. ... Kein Rauch, kein Ruß, keine Dampfmaschine, ja kein Feuer mehr...“.

Der Grund für Oswalds Erwähnung der Kohle anstelle von Wasserstoff liegt darin, dass Kohle der am weitesten verbreitete Energieträger im 19. Jahrhundert war.

Die Entdeckung Groves galt als Quantensprung, doch verschwand sie nach der Entwicklung des Dynamos durch Werner von Siemens im Jahre 1867 erst einmal wieder in den Geschichts- und Schulbüchern.

Mehr als ein Jahrhundert lang spielte die Erfindung keine wichtige Rolle, bis die bemannte amerikanische Raumfahrt die Technik wieder entdeckte. Die US-Raumfahrtbehörde NASA brachte das inzwischen als Brennstoffzelle bekannte Grovesche Prinzip zu neuen Ehren.

Quelle: [7]

2. Funktionsweise und Aufbau einer Brennstoffzelle

(siehe Anhang A)

Die Brennstoffzelle ist ein elektrochemischer Energiewandler. Aus Wasserstoff und Sauerstoff wird Energie, nämlich Gleichstrom erzeugt. Zwei Zellen einer Brennstoffzelle erzeugen etwa 0,7 Volt. Um die erforderlichen größeren Spannungen und Leistungen, wie sie in einem PKW gebraucht werden zu erzeugen, werden die Zellen zu Stacks verbunden.

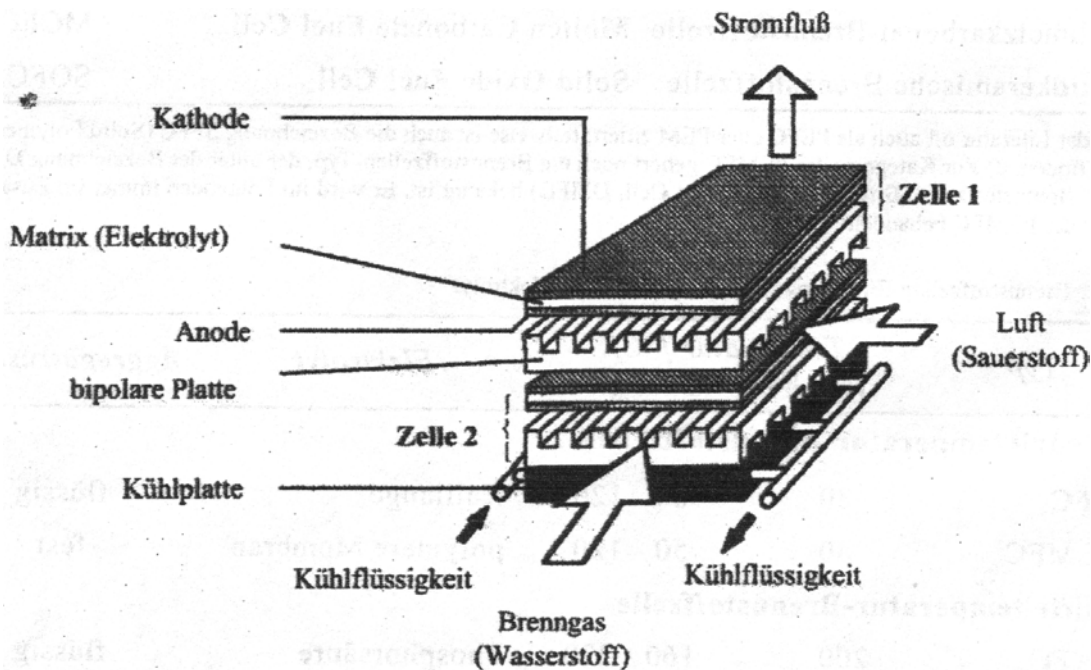


Abbildung 1: Prinzipieller Aufbau einer Brennstoffzelle

Die wesentlichen Bauteile einer Brennstoffzelle sind:

- Kathode
 - Elektrolyt
 - Anode
 - Bipolare Platte durch die der Sauerstoff geleitet wird
- } Zelle 1
- Kathode
 - Elektrolyt
 - Anode
 - Bipolare Platte durch die der Wasserstoff geleitet wird
- } Zelle 2

- bei Bedarf auch eine Kühlplatte durch die eine Kühlflüssigkeit fließt

Quellen: [1], [2], [3], [4]

3. Die verschiedenen Brennstoffzellentypen

(siehe Anhang B)

Grundsätzlich unterscheidet man hierbei drei verschiedene Arten:

- a) Niedrigtemperatur-Brennstoffzellen arbeiten bei Temperaturen von unter 100°C und benötigen Katalysatoren, um eine ausreichende Reaktionsgeschwindigkeit der elektrochemischen Reaktion zu gewährleisten. Außerdem ist eine hohe Brenngasreinheit erforderlich.
- b) Mitteltemperatur-Brennstoffzellen arbeiten bei Temperaturen von bis zu 200°C und sind bezüglich der einsetzbaren Brennstoffe flexibler.
- c) Hochtemperatur-Brennstoffzellen werden bei Temperaturen von bis zu 1000°C eingesetzt und haben die größte Brennstoffbandbreite der Brennstoffzellen.

3.1 Die Niedrigtemperatur-Brennstoffzellen

Polymer-Elektrolyt-Membran-Brennstoffzelle (PEMFC)

Die PEMFC arbeitet mit Luftsauerstoff als Reaktionsgas. Der benötigte Wasserstoff wird mit Hilfe eines Reformers erzeugt.

Diese Brennstoffzelle ist sehr empfindlich hinsichtlich CO im Brenngas, da CO ein Katalysatorgift ist.

Der Katalysator muss auf Grund des sauren Charakters der Membran aus Edelmetall bestehen.

Zur Anwendung kommen Platin oder Platin-Ruthenium-Legierungen.

Als Elektrolyt kommt eine protonenleitende, gasdichte, dünne Kunststoffmembran aus sulfoniertem Polymer zum Einsatz.

Der Arbeitsbereich der PEMFC liegt bei 50 – 80°C.

Ihre Einsatzgebiete gehen vom Handy über Fahrzeugantriebe bis hin zu Kleinkraftwerken.

Alkalische Brennstoffzelle (AFC)

Die AFC muss im Gegensatz zur PEMCF mit reinem Sauerstoff betrieben werden, da der in der Luft enthaltene Kohlendioxidgehalt das Elektrolyt zersetzen würde.

Als Elektrolyt wird eine Kalilauge verwendet. Auch die AFC ist gegenüber CO empfindlich, da auch Kohlenmonoxid der Kalilauge schadet.

Als Katalysator werden Edelmetalle wie Platin, Ruthenium, Paladium sowie deren Legierungen eingesetzt.

Der Arbeitsbereich der AFC liegt bei 60-90°C.

Aufgrund der hohen Reinheitsanforderung an die Reaktionsgase ist der Einsatz in Fahrzeugen eher unwahrscheinlich.

Die AFC wird hauptsächlich in der Raumfahrt eingesetzt.

Direktmethanol-Brennstoffzelle (DMFC)

Die DMFC ist eine Weiterentwicklung der PEMFC und arbeitet deshalb ebenfalls mit einer Kunststoffmembran als Elektrolyt.

Anders als die PEMFC benötigt die DMFC keinen Reformer. Das heißt die Brennstoffzelle kann an der Anode direkt mit flüssigem Methanol, bzw. mit Methanoldampf und an der Kathode mit Luft beaufschlagt werden.

Als Katalysatormaterial wird eine Legierung aus Platin und Ruthenium bevorzugt. Auch hier werden die Katalysatoren durch CO und andere Zwischenprodukte geschädigt.

Probleme bereitet noch die Zuverlässigkeit der Membrane, da hier derzeit noch der sogenannte „cross-over“-Effekt stattfindet. Bei diesem Effekt findet eine Diffusion des Methanols zur Sauerstoffelektrode statt, was zur Auswirkung hat, daß der Wirkungsgrad sinkt.

Die DMFC wird bei Temperaturen von 80-90°C bei flüssigem Methanol als Brennstoff sowie bei 120-130°C bei gasförmigem Methanol betrieben.

Die DMFC ist vor allem für mobile Anwendungen geeignet, wobei es gilt den Wirkungsgrad gegenüber der PEMFC noch zu steigern.

3.2 Mitteltemperatur-Brennstoffzellen

Phosphorsauere Brennstoffzelle (PAFC)

Als Elektrolyt dient hier eine konzentrierte Phosphorsäure in Gelform.

Deshalb eignen sich diese Brennstoffzellen für den Einsatz von kohlendioxidhaltigen Gasen, da Kohlendioxid nicht mit der Säure reagiert.

Aufgrund der Säure müssen hier allerdings als Katalysatoren säurebeständige Materialien, wie Platin oder Gold eingesetzt werden.

Die PAFC wird bei Temperaturen um 200°C betrieben.

Eingesetzt werden diese Brennstoffzellen vorwiegend in Heizkraftwerken.

3.3 Hochtemperatur-Brennstoffzellen

Schmelzkarbonat-Brennstoffzelle (MCFC)

Es wird ein Elektrolyt in Form geschmolzener Karbonate verwendet, meist in einer hochporösen, keramischen Matrix fixierte Alkalikarbonate, wie Lithiumkarbonat oder Kaliumkarbonat. Die Ionenleitung erfolgt über Karbonationen. Diese erlaubt die elektrochemische Umsetzung von Wasserstoff/Kohlenstoffgemischen.

Die MCFC ist in der Lage verschiedene Brenngase direkt zu verarbeiten.

MCFC arbeiten bei Temperaturen von 620 – 660°C.

Diese Brennstoffzelle wird hauptsächlich in Kraftwerken und Heizkraftwerken eingesetzt.

Oxidkeramische Brennstoffzelle (SOFC)

Als Elektrolyte dienen hier gasdichte keramische Festelektrolyte wie Zirkonoxid. Aufgrund der hohen Betriebstemperatur von bis zu 1000°C können auch CO-haltige Gasgemische verwendet werden.

Durch die interne Reformierung des Brennstoffs ist es auch hier möglich verschiedene Brenngase zu verwenden.

Die oxidkeramische Brennstoffzelle wird, genauso wie die Schmelzkarbonat-Brennstoffzelle, ausschließlich stationär in Kraftwerken und Heizkraftwerken verwendet.

3.4 Fazit

Für die Anwendung in Fahrzeugen eignen sich im Prinzip ausschließlich die Niedertemperatur-Brennstoffzellen PEMFC, DMFC, und AFC.

Aufgrund der Tatsache, dass die AFC reinen Sauerstoff benötigt, wird auch diese Möglichkeit wegfallen.

Für die Anwendung der Brennstoffzelle im PKW bleiben also nur PEMFC und DMFC übrig.

Hierbei ist allerdings zu beachten, dass die PEMFC zwar den höheren Wirkungsgrad besitzt, aber einen Reformier benötigt.

Quellen: [1], [2], [3], [4]

4. Treibstoffe

(siehe Anhang C)

4.1 Erdgas

Erdgas ist ein Primärenergieträger und zählt zu den erschöpflichen Energiequellen. Erdgas wird in Hochtemperatur-Brennstoffzellen direkt und in PAFC bzw. PEMFC nach der Reformierung genutzt. Außerdem ist es ein möglicher Ausgangsstoff für Methanol.

Quelle: [3]

4.2 Spalt- und Synthesegas

In der chemischen Industrie fallen Synthesegase in unterschiedlicher Reinheit und Zusammensetzung an. Aufgrund dieser Eigenschaften müssten diese Gase für die Verwendung in Mittel- bzw. Niedertemperatur-Brennstoffzellen, sorgfältig gereinigt werden.

Deshalb ist der Einsatz dieser Gase zwar möglich, jedoch für mobile Anwendungen technisch und energetisch zu aufwendig.

Quelle: [3]

4.3 Biogas

Biogase sind das Ergebnis bakterieller Zersetzung organischer Substanzen, wie Klärschlamm, Holz, Abfall, etc..).

Hauptbestandteile von Biogasen sind Methan (50 – 75%) und Kohlendioxid (25-50%).

Die chemische Zusammensetzung von Biogasen variiert in Abhängigkeit der Ausgangsstoffe erheblich, so dass eine Gasaufbereitung erforderlich ist.

Biogase sind für den Einsatz in PEMFC zwar möglich, aufgrund der notwendigen Gasaufbereitung aber nur für stationäre Einsätze einsetzbar.

Quelle: [3]

4.4 Kohle

Kohle ist ein Primärenergieträger, muss aber für die Bereitstellung von wasserstoffhaltigem Brennstoff zunächst vergast werden.

Das dadurch entstehende Synthesegas ist nur in Hochtemperatur-Brennstoffzellen nutzbar und somit für mobile Anwendungen uninteressant.

Quelle: [3]

4.5 Methanol

Methanol wird hauptsächlich aus Rohstoffen wie Erdgas, schweren Rückstandsölen oder bei der Kohlevergasung gewonnen. Möglich ist auch eine Methanolerzeugung aus Biomasse oder Reststoffen.

Methanol wird in der DMFC direkt und in der PEMFC mit einem Reformier nutzbar gemacht.

Vorteil des Treibstoffs Methanol ist, dass das bereits bestehende Tankstellennetz nur geringfügig verändert werden müsste.

Deshalb gilt die mit Methanol betriebene Brennstoffzelle als eine mögliche Alternative zum konventionellen Verbrennungsmotor.

Quelle: [3]

4.6 Benzin- und Dieselkraftstoffe

Diese Treibstoffe müssen reformiert werden und können ebenfalls in einer Brennstoffzelle eingesetzt werden. Jedoch benötigt die Reformierung von z.B. Benzin höhere Temperaturen, wodurch die Effizienz des Reformers, gegenüber reinem Methanol sinkt.

Außerdem ist mit einem höherem Schadstoffausstoß durch den Reformier zu rechnen.

Quelle: [3]

4.7 Dimethylether

Ähnlich wie Methanol lässt sich Dimethylether (DME) aus Synthesegas gewinnen. Außerdem fällt DME bei der Methanolherstellung als Nebenprodukt an.

Es kann sowohl in Dieselmotoren als auch für Brennstoffzellen (nach einer Reformierung) verwendet werden.

Quelle: [3]

4.8 Wasserstoff

Als Brennstoff in Brennstoffzellen am geeignetsten ist Wasserstoff.

Zur Erzeugung gibt es verschiedene Möglichkeiten.

- Dampfreformierung von Erdgasen
- Einwirkung von Wasserdampf auf Kohle (als Produkt entsteht Wassergas)
- Elektrolytische Wasserspaltung durch elektrische Energie (bei regenerativer Energie ist die Spaltung zudem kohlendioxidfrei)

Für die Anwendung im PKW sind aufwendige Speichermedien erforderlich:

- Flüssigwasserstoffspeicherung (Kryo-Tank): Hier wird der Wasserstoff bei -253°C gespeichert. Dazu werden hochisolierte Speichermedien, Transferleitungen und Tankkupplungen benötigt. Als Vorteil ist eine schnelle Betankungszeit zu nennen.
- Druckwasserstoffspeicherung: Der Wasserstoff wird unter einem Druck von 200-300 bar gespeichert.
- Metallhybridspeicher: Es erfolgt eine Anlagerung des gasförmigen Wasserstoffs an metallischen Legierungen bei einem Druck von 0 bis 60 bar. Die Vorteile sind eine hohe volumenspezifische Speicherdichte und eine weitgehend verlustfreie Speicherung auch über längere Zeitdauer. Nachteile dieser Speichermethode sind die niedrige massenspezifische Speicherdichte, sowie das Problem, dass für die Freisetzung des Wasserstoffs teilweise hohe Temperaturen nötig sind.
- Grafitnanofaserspeicherung: Der Wasserstoff lagert auf Grafitfasern an. Ziel für die Zukunft ist, dass bis zu 75% des Carbongewichts in Form von Wasserstoff gespeichert werden können. Derzeit ist es möglich etwa 10 bis 20% des Gewichts des Tanks als Wasserstoff zu speichern.

Quellen: [3], [5], [6]

5. Emissionen

(Siehe Anhang D)

Es werden hierbei verschiedene Wirkungskriterien bearbeitet, wobei die Emissionen, die durch den eigentlichen Fahrbetrieb entstehen, sowie durch die Bereitstellung der dabei verbrauchten Endenergieträger, betrachtet werden.

Die dabei eingefügten Diagramme vergleichen jeweils folgende Antriebe in %:

- Ottomotor: Ist jeweils die Referenz für die anderen Antriebe und entspricht damit der „Null-Linie“ in den nachfolgenden Diagrammen.
- Dieselmotor: In den Abbildungen wird nur der konventionelle Dieselmotor betrachtet.
- Verbrennungsmotor mit flüssigem Erdgas als Treibstoff
- Verbrennungsmotor mit flüssigem Wasserstoff, der regenerativ erzeugt wird.
- Beliebige Brennstoffzelle, die ebenfalls mit regenerativ erzeugtem Wasserstoff betrieben wird.
- PEMFC betrieben mit Methanol durch Reformierung
- DMFC betrieben mit Methanol
- Elektrofahrzeug mit Batteriebetrieb

Für weitere Treibstoffe ist auf die Tabellen 12-14 in der Literaturstelle [3] im Anhang D zu verweisen.

Quelle: [3]

5.1 Treibhauseffekt

Die Emission klimarelevanter Gase, wie Kohlendioxyd, Ozon, Lachgas und FCKWs greift das Gleichgewicht des Erdklimas an.

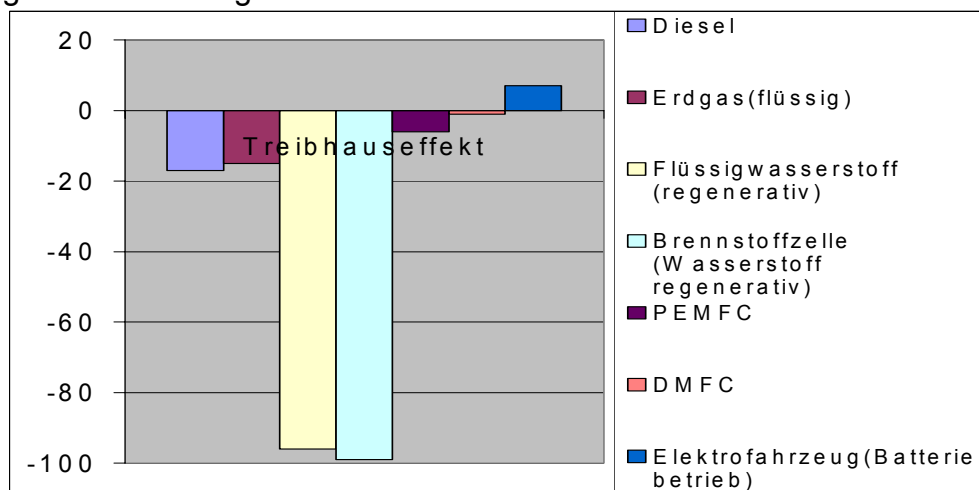


Abbildung 2: Treibhauseffekt

Grundsätzlich gilt hier, dass Fahrzeuge, die mit regenerativ erzeugten Treibstoffen betrieben werden, deutliche Vorteile aufweisen.

Deshalb ist der Antrieb mit Brennstoffzellen auch nur dann gegenüber den konventionellen Antrieben mit Verbrennungsmotor überlegen, wenn regenerativ erzeugter Treibstoff eingesetzt wird.

Gegenüber dem Dieselmotor, der bei den Verbrennungsmotoren am besten abschneidet, haben die Fahrzeuge mit nicht-regenerativ erzeugten Treibstoffen (Benzin, Methanol...) betriebenen Brennstoffzellen sogar Nachteile.

Quelle: [3]

5.2 Ozonabbau

Wesentlich für den Ozonabbau sind Substanzen wie N_2O und FCKW.

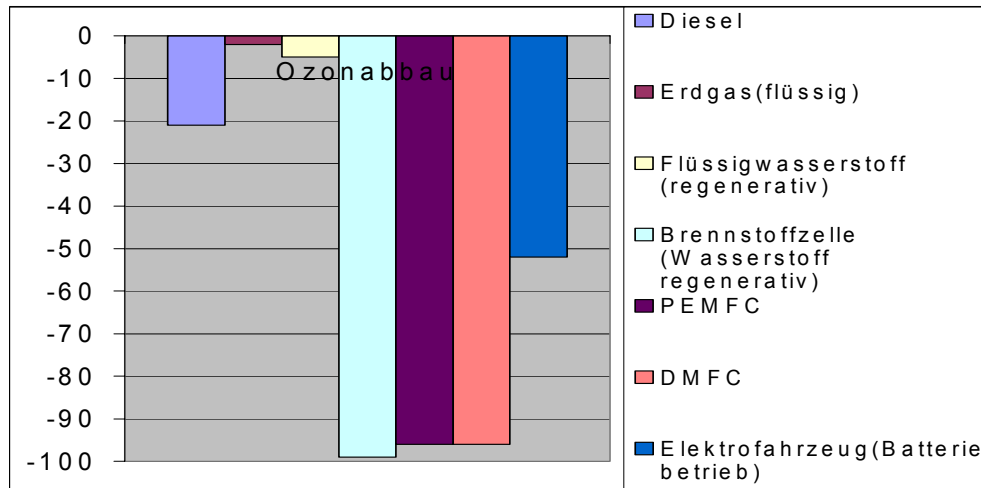


Abbildung 3: Ozonabbau

Gegenüber den konventionellen Antrieben weisen Antriebe mit Brennstoffzellen, mit Ausnahme des Antriebs mit Bioethanol, sehr große Vorteile auf.

Quelle: [3]

5.3 Kanzerogenität

Dies beschreibt die Auswirkung der Emissionen auf die menschliche Gesundheit durch deren krebserregender Wirkung.

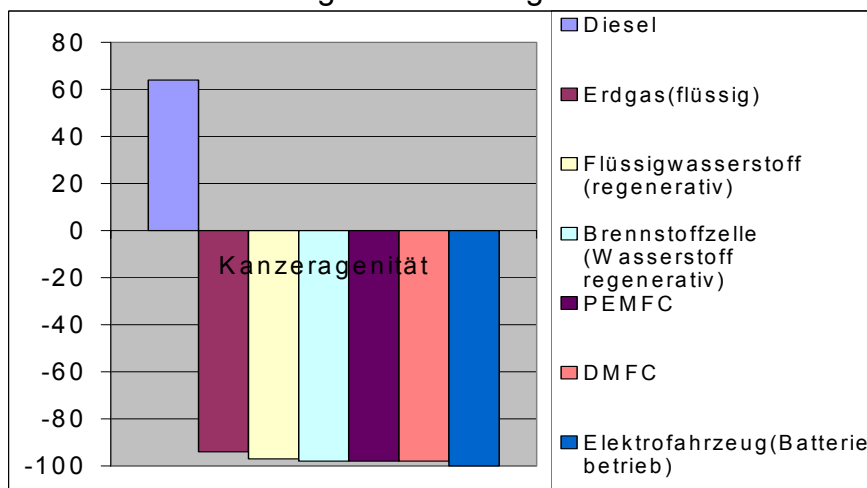


Abbildung 4: Kanzerogenität

Hier fällt auf, dass ausschließlich Verbrennungsmotoren im wesentlichen durch Rußemissionen bei der Verwendung kohlenstoffhaltiger Kraftstoffe die menschliche Gesundheit beeinträchtigen.

Alle Antriebe mit Brennstoffzellen weisen dagegen keine Rußemissionen auf und sind daher bei der Kanzerogenität zu vernachlässigen.

Quelle: [3]

5.4 Versauerung

Verschiedene Spurengase, wie Stickoxide, Schwefeldioxyd und Ammoniak verringern den pH-Wert des Bodens und der Gewässer.

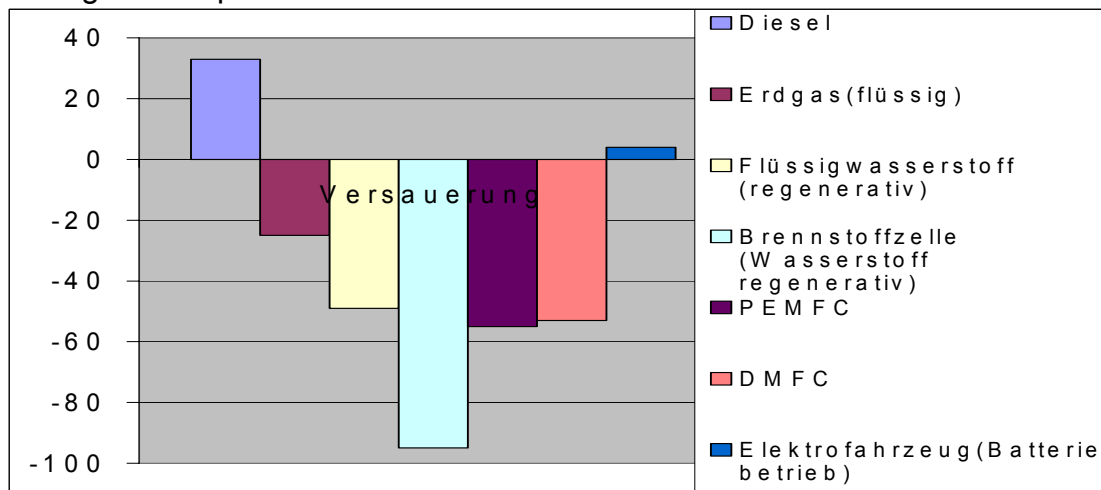


Abbildung 5: Versauerung

Auffallend ist hier, dass alle Brennstoffzellen mit Bio-Treibstoffen sogar gegenüber den konventionellen Antrieben erhebliche Nachteile haben. Dies kommt daher, dass vor allem bei der Bereitstellung von Bio-Treibstoffen erhebliche Belastungen durch Ammoniak anfallen. Im Gegensatz dazu haben alle anderen Treibstoffe für Brennstoffzellen erhebliche Vorteile gegenüber den Verbrennungsmotoren, insbesondere der regenerativ erzeugte Wasserstoff schneidet sehr gut ab.

Quelle: [3]

5.5 Ressourcenverbrauch

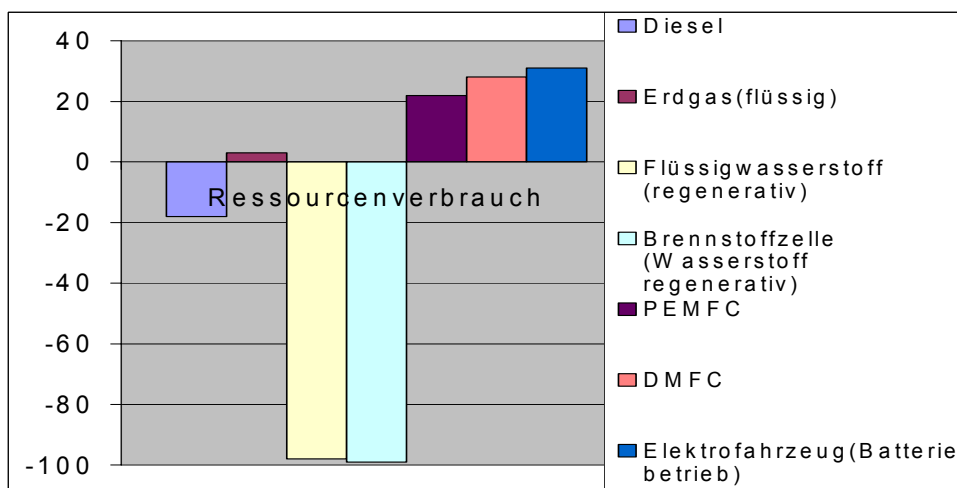


Abbildung 6: Ressourcenverbrauch

Größte Vorteile haben hier natürlich die regenerativ erzeugten Treibstoffe. Deshalb sind die Brennstoffzellen, die mit Treibstoffen wie regenerativen Wasserstoff sowie den Bio-Treibstoffen, deutlich überlegen. Alle anderen Treibstoffe für Brennstoffzellen weisen hingegen gegenüber den Verbrennungsmotoren sogar einen erhöhten Ressourcenverbrauch auf.

Quelle: [3]

5.6 Energieverbrauch

Zusätzlich zum im Punkt 6.4 betrachteten Ressourcenverbrauch wird hier noch der Energieverbrauch ausgewertet. Im folgenden Diagramm ist der Energieaufwand in MJ (Megajoule) dargestellt um 1 MJ Energie bereitzustellen.

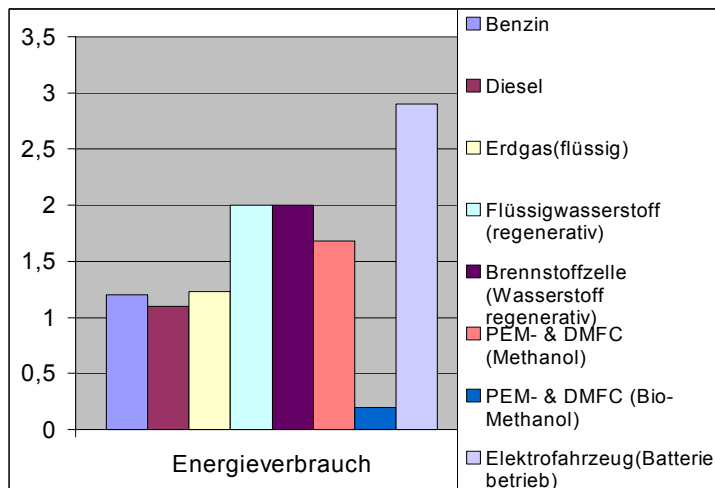


Abbildung 7: Energieverbrauch

Bei den Verbrennungsmotoren, die mit Benzin, Diesel und Erdgas betrieben werden, gibt es nur geringe Unterschiede. Für 1MJ Energie wird nur geringfügig mehr Energie benötigt. Regenerativ erzeugter Wasserstoff benötigt nur deshalb soviel Energie, weil zur Speicherung von dem flüssigen Wasserstoff viel Energie notwendig ist. Die PEM- und die DMFC können mit Methanol betrieben werden, welches zur Bereitstellung weniger Energie benötigt als flüssiger Wasserstoff, aber immer noch mehr Energie, wie die konventionellen Treibstoffe.

Am besten schneiden, ähnlich wie beim Ressourcenverbrauch, die Bio- Treibstoffe ab.

Quelle: [3]

6. Antriebskonzepte

In diesem Abschnitt werden die Antriebskonzepte Verbrennungsmotor, Elektromotor und Hybridantrieb näher betrachtet. Dabei werden die einzelnen Antriebskonzepte hinsichtlich der Eignung für verschiedene Energieträger untersucht.

6.1 Energieträger

Im folgenden werden verschiedene, alternative Energieträger auf ihre Eignung als Energiespender für den mobilen Einsatz untersucht. Die Bewertung der Energieträger erfolgt größtenteils durch die Gegenüberstellung zu den zur Zeit gebräuchlichsten Treibstoffen Benzin und Diesel.

Bewertungskriterien sind die Energiedichte des Energieträgers, das zu verwendete Speichersystem und das Verteilersystem.

6.1.1 Benzin/Diesel:

Energiedichte: Die Energiedichten von Benzin und Diesel werden in der Literaturstelle [8] folgendermaßen angegeben:

Energiedichte Benzin: ca. 8,6 kWh/l ca. 9,8 kWh/kg	Energiedichte Diesel: ca. 9,8 kWh/l ca. 10 kWh/kg
--	---

Speichersystem: Benzin und Diesel sind flüssige Kraftstoffe, welche in einem normalen Tanksystem im Fahrzeug mitgeführt werden können. Aufgrund der hohen Energiedichte der beiden Kraftstoffe kann die Größe des Speichersystems relativ klein im Vergleich zu anderen Energieträgern gehalten werden. Abbildung 8 zeigt die Gegenüberstellung von Tankvolumen und Tankmasse verschiedener Energieträger. Diese Größen wären nötig um dem Energiegehalt von 83 l Benzin zu entsprechen.

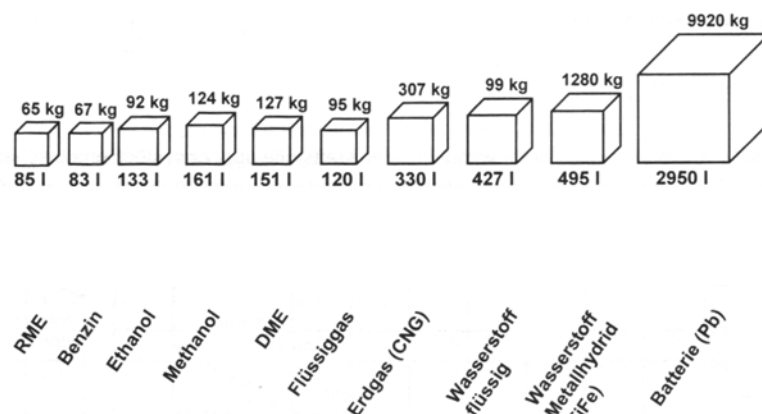


Abbildung 8: Größe von Speichersystemen unter Berücksichtigung von Tankvolumen und -masse entsprechend einem nutzbaren Energiegehalt von 83 l Benzin/ nach Quelle [19]

Distributionsstruktur: Die Verteilerstruktur ist in Deutschland voll auf die beiden konventionellen Treibstoffe ausgerichtet.

6.1.2 Erdgas

Energiedichte: Die Energiedichten von flüssigem und gasförmigen Erdgas werden in der Literaturstelle [8] folgendermaßen angegeben:

CNG-Compressed Natural Gas: Energiedichte: ca. 1,5 kWh/l ca. 3,8 kWh/kg	LNG-Liquefied Natural Gas: Energiedichte: ca. 3,3 kWh/l ca. 7,4 kWh/kg
--	---

Dies entspricht bei Einsatz von gasförmigem Erdgas nur 17% der Energiedichte von Benzin und 15% der von Diesel. Bei flüssigem Erdgas beträgt die Energiedichte immerhin ca. 38% der von Benzin und fast 34% der von Diesel. Diese Angaben beziehen sich auf den Energieinhalt eines Liters Benzin oder Diesel.

Speichersystem: Ein Nachteil von Erdgas ist die aufwendige Speicherung des Kraftstoffes, die unter hohem Druck und bei tiefen Temperaturen erfolgen muss. Dies verursacht Mehrkosten und je nach System teilweise erhebliche Mehrgewichte für das Fahrzeug selbst, die bei einem herkömmlichen Benzin- oder Dieselfahrzeug nicht anfallen.

Distributionsstruktur: Für Erdgas existiert bereits eine sehr grobmaschige Verteilerstruktur.

6.1.3 Rapsölmethylester RME und Dimethylether DME

Energiedichte: Die Energiedichte von DME wird in der Literatur [8] mit folgenden Werten angegeben:

Energiedichte Dimethylether:
ca. 4,8 kWh/l
ca. 5,2 kWh/kg

Damit liegt die Energiedichte von DME bei ungefähr der Hälfte der Energiedichte von herkömmlichen Diesel.

Speichersystem: Kann wie mineralischer Diesel gespeichert werden.

Distributionsstruktur: Das Tankstellennetz für Biodiesel wird in Deutschland immer dichter.

6.1.4 Wasserstoff

Energiedichte: Betrachtet man die Energiedichten von Wasserstoff, so beträgt die Energiedichte von flüssigem Wasserstoff auf das Volumen bezogen gerade mal 14% der Energiedichte von Benzin und nur 12% der von Diesel. Damit ist die Energiedichte von flüssigem Wasserstoff mit der von gasförmigem Erdgas vergleichbar.
Bei gasförmigem Wasserstoff beträgt die Energiedichte auf das Volumen bezogen gerade mal 5% der Energiedichte von Benzin und 4% der Energiedichte von Diesel.
Die Angaben der Energiedichte entstammen der Literaturstelle [8].

LH2 – verflüssigter Wasserstoff	GH2 – gasförmiger Wasserstoff
Energiedichte: 1,2 kWh/l	Energiedichte: 0,4 kWh/l
4,9 kWh/kg	1,8 kWh/kg

Speichersystem: Die verschiedenen Möglichkeiten Wasserstoff zu speichern, sind im Abschnitt 4.8 näher beschrieben.
Im Vergleich zur Speicherung der konventionellen Kraftstoffe ist zu sagen, dass die Wasserstoffspeicherung mit einem erheblich höheren Aufwand erfolgen muss.

Distributionsstruktur: Eine Verteilerstruktur existiert zur Zeit nicht.

6.1.5 Methanol

Energiedichte: Die Energiedichte von Methanol wird in der Literatur [8] mit folgenden Werten angegeben.

Energiedichte Methanol:

4,2 kWh/l

4,6 kWh/kg

Damit zeigt sich das Methanol, im Vergleich zu flüssigem Wasserstoff, eine ca. 29% höhere Energiedichte besitzt.

Speichersystem: Methanol ist bei normalen Umgebungstemperaturen flüssig und kann daher ähnlich wie Benzin oder Diesel transportiert werden. Dies ist im Abschnitt 3.5 näher beschrieben.

Distributionsstruktur: Für Methanol existiert in Deutschland noch keine Verteilerstruktur, die bestehende könnte aber durch geringfügige Änderungen genutzt werden.

6.2 Energiewandlung

In dem Kapitel Energiewandlung werden die verschiedenen Antriebe miteinander verglichen. Dabei werden verschiedene Daten während des Fahrbetriebes und der Kraftstoffherstellung auf ein fiktives Fahrzeug bezogen.

Der Versuchsablauf ist auf den neuen Europäischen Fahrzyklus Teil I und II ausgerichtet. Die Berechnung berücksichtigt den Fahrbetrieb sowie den Energiebedarf für die Kraftstoffherstellung (vom Primärenergieträger über Raffinerie oder Kraftwerk bis zum Tank bzw. Energiespeicher). Die folgenden Diagramme sind der Literaturstelle [22] entnommen. Abbildung 9 zeigt den Energiebedarf verschiedener Antriebsdaten.

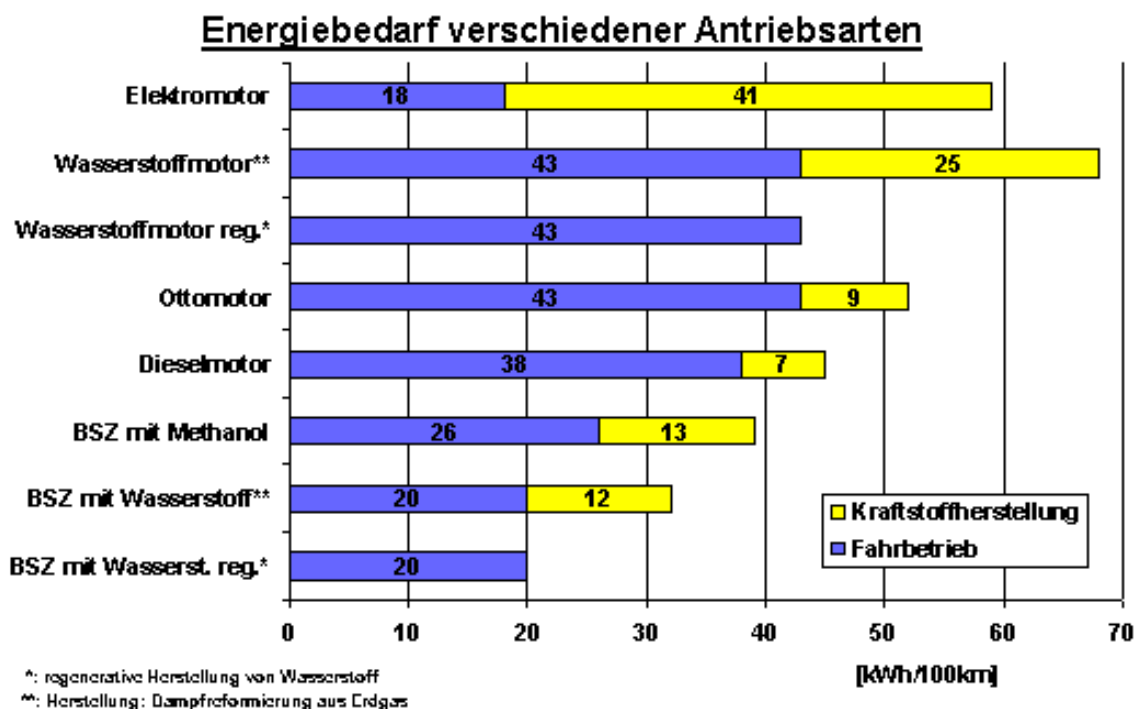


Abbildung 9: Antriebe im Vergleich
Quelle: [22]

Auffällig ist dass im Fahrbetrieb (blauer Balken) die verschiedenen Verbrennungsmotoren vergleichsweise schlecht abschneiden. Die Brennstoffzelle schneidet wesentlich besser ab mit ungefähr der Hälfte des Energiebedarfs eines Verbrennungsmotors. Den geringsten Energiebedarf im Fahrbetrieb zeigt der Elektromotor.

Bei der Kraftstoffherstellung (gelber Balken) zeigen die herkömmlichen Verbrennungsmotoren Otto- und Dieselmotor den geringsten Energiebedarf. Die Gewinnung von Wasserstoff für den Verbrennungsmotor ist dagegen wesentlich aufwendiger. Der hohe Energiebedarf zur Kraftstoffherstellung beim Wasserstoff für den Verbrennungsmotor von 25 kWh/100km ist auf den hohen Bedarf des Verbrennungsmotors im Fahrbetrieb von 43 kWh/100km zurückzuführen. Im Vergleich dazu benötigt die Wasserstoffbereitstellung für die Brennstoffzelle nur die Energie von 12 kWh/100km, da die Brennstoffzelle im Fahrbetrieb einen wesentlich geringeren Energiebedarf von 20 kWh/100km hat. Die Erzeugung von Methanol für die Brennstoffzelle benötigt eine Energie von 13 kWh/100km. Am meisten Energie für die Kraftstoffherstellung benötigt der Elektromotor.

Ein weiterer Punkt der zum Vergleich verschiedener Antriebe betrachtet werden muss, ist das benötigte Speichervolumen von einem Energieträger, um eine definierte Entfernung zurücklegen zu können.

Das hier verwendete Diagramm stammt aus der Literaturstelle [22]. In der Abbildung ist das benötigte Speichervolumen eines Kraftstoffes dargestellt, um eine Reichweite von 750 km zu erreichen.

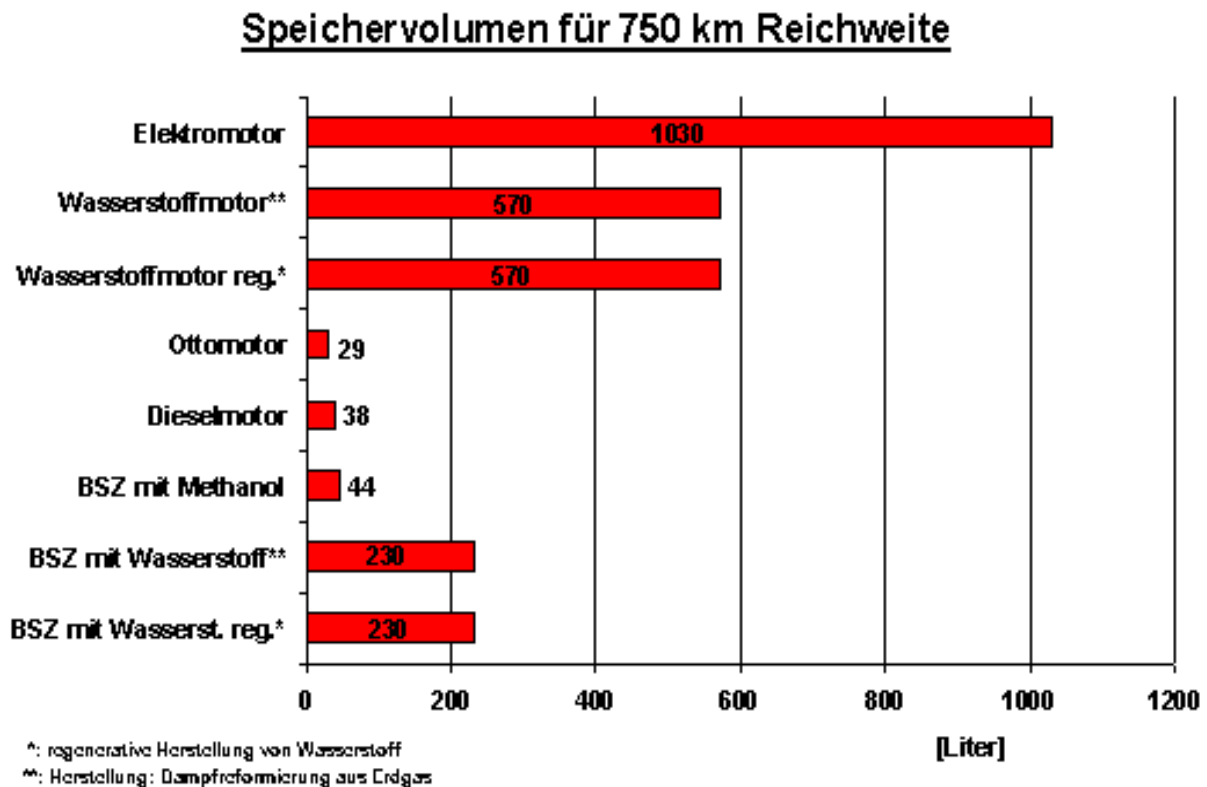


Abbildung 10: Tankvolumina im Vergleich
 Quelle: [22]

Aus der Abbildung wird deutlich, dass die Energiespeicherung für den Elektromotor mit 1030 l den größten Platzbedarf aller betrachteten Antriebe aufweist. Im Vergleich dazu benötigt die Speicherung von Wasserstoff für den Verbrennungsmotor mit 570 l etwa nur die Hälfte des Speichervolumens, dessen was die Batterie des Elektromotors benötigt. Der Platzbedarf für die Wasserstoffmenge der Brennstoffzelle beträgt nur etwa 230 l. Dies resultiert aus dem geringeren Fahrverbrauch der Brennstoffzelle gegenüber dem Verbrennungsmotor. Das notwendige Speichervolumen für Methanol beträgt nur etwa 44 l und erreicht damit eine Größenordnung wie sich die herkömmlichen Kraftstoffe aufweisen. Diese Kraftstoffe, Benzin und Diesel, benötigen das geringste Speichervolumen für eine Reichweite von 750 km.

Des weiteren müssen auch die Schadstoffemissionen der unterschiedlichen Antriebe miteinander verglichen werden. Dies erfolgt in der Abbildung 11.

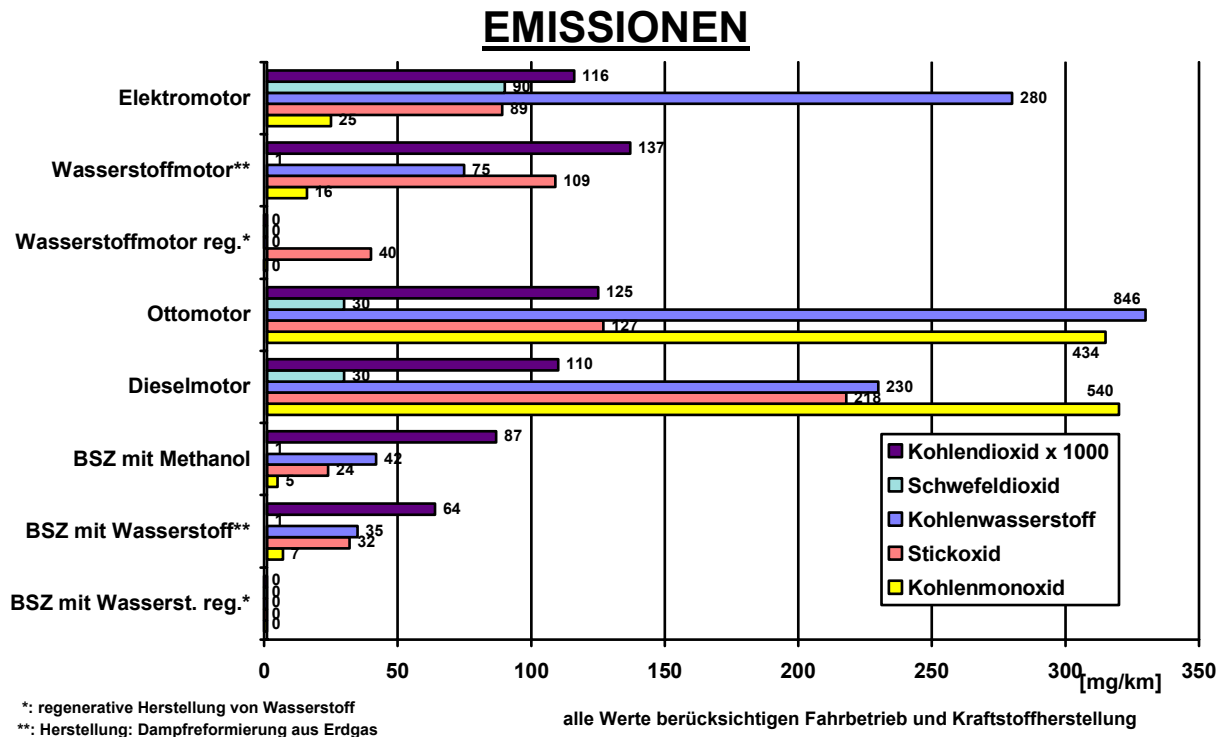


Abbildung 11: Emissionen im Vergleich
 Quelle: [22]

Die Gegenüberstellung berücksichtigt sowohl den Fahrbetrieb als auch die Kraftstoffherstellung. Aus der Abbildung wird deutlich, dass der Otto- und Dieselmotor nahezu bei allen Emissionen die höchsten Werte aufweist. Ebenfalls ist auffällig, dass die Brennstoffzelle im wesentlichen nur Kohlendioxid emittiert. Wird der Wasserstoff regenerativ erzeugt, treten praktisch keine Emissionen auf. Auch regenerativ erzeugter Wasserstoff für den Verbrennungsmotor erzeugt in der Schadstoffbilanz fast keine Emissionen.

Hybridfahrzeuge wurden in der Betrachtung nicht berücksichtigt. Für Hybridfahrzeuge konnte im Rahmen dieser Recherche nur eine allgemeine Betrachtung durchgeführt werden.

Die folgende Tabelle zeigt eine Beschreibung der Funktion, des Nutzens und "Schwächen" des Hybridantriebes in den Fahrzyklen Stadt, Überland, Autobahn und Berg ab.

			
<p>Funktion des reinen Elektroantriebs: Der Elektromotor erhält seinen Strom aus der mitgeführten Speicherbatterie. Der Verbrennungsmotor bleibt abgeschaltet.</p>	<p>Funktion des Antriebs mit Verbrennungsmotor : Das Benzin- oder Dieselaggregat sorgt für Vortrieb und lädt gleichzeitig die Batterien. Der Elektromotor bleibt abgeschaltet.</p>	<p>Funktion des Hybridbetriebes: Der Elektromotor läuft zusätzlich zum Verbrennungsmotor . Beide Antriebe wirken für den Vortrieb, im Schubbetrieb entsteht Ladespannung.</p>	<p>Im Schubbetrieb, beim Ausrollen und Bremsen wandelt der Elektromotor/Generator kinetische Energie in Ladestrom um, der in der Batterie gebunkert wird.</p>
<p>Das Hybridauto läuft in diesem Modus leise, und es entstehen keine Abgasemissionen. Das Fahrzeug kann also auch bei Smog-Alarm ohne Einschränkungen betrieben werden.</p>	<p>Die Fahrleistungen und das Temperament entsprechen Fahrzeugen mit konventionellem Antrieb. Die Batterien werden unterwegs aufgeladen, das Auto muss somit nicht an die Steckdose.</p>	<p>Nutzen, durch die gebündelte Kraft erreicht das Hybridfahrzeug seine maximale Leistung und seine Höchstgeschwindigkeit. Auch für einen Zwischenspurtritt steht ausreichend Kraft bereit.</p>	<p>Ein Hybridauto kann durch Energierückgewinnung zusätzlich Kraftstoff sparen. Die Elektromotorbremse hilft, den Verschleiß an Bremsen gering zu halten. Der Motor ist aus und damit leise.</p>
<p>Beschleunigung, Aktionsradius und Leistungsreserven sind durch die Batteriekapazität begrenzt.</p>	<p>Die zusätzliche Hybridtechnik hat hier keinen Vorteil, sie muss lediglich mitgeschleppt werden.</p>	<p>Es entstehen Abgasemissionen, Kraftstoff und elektrische Kapazität werden verbraucht.</p>	<p>Bei starkem Gefälle müssen die konventionellen Bremsen natürlich zusätzlich betätigt werden.</p>

Quelle [27]

Bei der Betrachtung von Hybridantrieben muss noch eine Unterscheidung zwischen "Paralleler Hybrid" und "Serieller Hybrid" getroffen werden.

Paralleler Hybrid

Dort sind der Verbrennungsmotor und Elektromotor mechanisch mit den Antriebsrädern gekoppelt. Die beiden Antriebssysteme können sowohl einzeln als auch gleichzeitig zum Vortrieb des Fahrzeuges genutzt werden. Üblicherweise wird der elektrische Antriebszweig für den Stadtverkehr ausgelegt, während der leistungsstärkere Verbrennungsmotor für den Überlandverkehr und auf der Autobahn genutzt werden.

Quelle: [3]

Serieller Hybrid

Kennzeichen ist die Reihenschaltung der Energiewandler ohne mechanische Anbindung des Verbrennungsmotors an die Antriebsräder. Der Verbrennungsmotor treibt hierbei einen Generator an, der seinerseits den elektrischen Fahrtrieb sowie einen Speicher (Batterie) mit Energie versorgt. Serielle Hybridantriebe können Vorteile bei den Emissionen, jedoch nicht bei der Energieeinsparung erbringen.

Quelle: [3]

7. Fahrzeugkonzepte-PKW

Bei einem Brennstoffzellenantrieb handelt es sich nicht um einen neuen Motor. Ein Brennstoffzellenfahrzeug ist mit einem elektromotorgetriebenen Fahrzeug (Elektrofahrzeug) vergleichbar, bei dem die Batterie durch eine neue Form der Stromerzeugung – das Brennstoffzellensystem – ersetzt worden ist. Energielieferant für das Stromerzeugungssystem ist ein in einem Tank mitgeführter wasserstoffhaltiger Kraftstoff.

Wie unter 3.4 beschrieben werden gegenwärtig für Fahrzeugantriebe nahezu ausschließlich Konzepte mit PEMFC verfolgt.

Nun werden die Fahrzeugkonzepte verschiedenster Automobilhersteller, die sich mit der Brennstoffzelle als Energielieferant beschäftigen, vorgestellt. Zur Ergänzung sind auch Konzepte, die den Wasserstoffverbrennungsmotor als Antrieb verwenden aufgeführt. Die nahezu zu jedem Fahrzeug aufgeführten technischen Daten können in ausführlicher Form in der Literaturstelle [12] nachgelesen werden.

7.1 GM/Opel

Opel verfolgt das Ziel ein Brennstoffzellen-Fahrzeug mit Flüssigwasserstoff in Serie zu produzieren.

Der erste von Opel vorgestellte Prototyp eines Brennstoffzellen-Fahrzeugs ist der Hydrogen1. Die wichtigsten Leistungsdaten sind im folgenden aufgeführt.

HydroGen1: (2000)

Antrieb: Brennstoffzellenstack mit 80 kW Dauer- und 120 kW Spitzenleistung
Asynchron-Drehstrommotor

Tanksystem: Kryotank für 75l bzw. 5kg Flüssigwasserstoff

Höchstgeschwindigkeit: 140 km/h

Reichweite: 400 km

Gewicht: 1750 kg (Vergleich Benzinfahrzeug der Serie ca. 1400 kg)

Bauart: Prototyp auf Basis des Compact Van Zafira

Die weitere Entwicklung des Hydrogen1 ist der Hydrogen3. Primäres Ziel der HydroGen3-Entwicklung war es, die Leistungsfähigkeit und Alltagstauglichkeit des Antriebssystems zu verbessern.

Die wichtigsten Veränderungen sind:

- Keine Hochleistungs-Pufferbatterie
- Höhere Leistungsdichte der Brennstoffzellen-Einheit, keine externen Befeuchtungskomponenten
- Kompaktes Antriebsmodul

- Laderaumgröße wie Serienmodell
- Klimaanlage, Diagnosesystem

Genauere Angaben zu den Auswirkungen der Neuerungen können dem Anhang entnommen werden.

Quelle [23]

Die wichtigsten technischen Daten sind im folgenden dargestellt.

HydroGen3: (2001)

Antrieb: Brennstoffzellenstack mit 94 kW Dauer- und 129 kW Spitzenleistung
Asynchron-Drehstrommotor

Tanksystem: Kryotank für 68l bzw. 4,6kg Flüssigwasserstoff

Höchstgeschwindigkeit: 150 km/h

Reichweite: 400 km

Gewicht: 1650 kg (Vergleich Benzinfahrzeug der Serie ca. 1400 kg)

Bauart: Prototyp auf Basis des Compact Van Zafira

Vor kurzem präsentierte Opel das **Konzeptfahrzeug AUTOnomy**. Dieses Fahrzeug wurde konsequent auf die Vorteile der Brennstoffzelle hin konzipiert. Im Gegensatz zu den bisherigen Studien Hydrogen1 und Hydrogen3 entstand AUTOnomy nicht auf der Basis eines Serienmodells, sondern wurde von Grund auf neu um den Wasserstoff-Antrieb herum konstruiert.

Genauere Angaben über technische Daten der Studie konnten nicht recherchiert werden.

Quelle: [24]

7.2 DaimlerChrysler

Bei DaimlerChrysler laufen alle Brennstoffzellen-Fahrzeugkonzepte unter dem Namen NECAR, was eine Abkürzung für „New Electric Car“ darstellt. Im folgenden werden die Entwicklungsschritte von NECAR 1 zu NECAR 5 verfolgt und dargestellt.

Mit dem 1994 präsentierten NECAR 1 versuchte Daimler-Benz der Öffentlichkeit zu zeigen, dass die Brennstoffzellentechnik prinzipiell für den mobilen Einsatz in Fahrzeugen geeignet ist.

Die wichtigsten technischen Daten von NECAR 1 werden in der Literatur so angegeben:

NECAR 1: (1994)

Antrieb: Brennstoffzellenstacks mit 50 kW Leistung
Elektromotor

Tanksystem: 150 Liter komprimiertes Wasserstoffgas bei 300 bar Druck

Höchstgeschwindigkeit: 90 km/h

Reichweite: 130 km

Gewicht: 3500 kg

Bauart: Prototyp auf Basis eines MB 100 Transporters

Von Interesse ist, dass die gesamte Ladekapazität des Mercedes-Benz-Transporters mit den ca. 800 kg schweren Komponenten zur Energieerzeugung ausgefüllt war.

Dieses Fahrzeug konnte nur der erste Schritt zur Entwicklung eines Alltagstauglichen Brennstoffzellen-Fahrzeuges sein.

Bereits 1996 stellte Mercedes mit dem NECAR 2 ein gegenüber dem NECAR 1 deutlich überarbeitetes Brennstoffzellen-Fahrzeug vor.
Die wichtigsten technischen Daten von NECAR 2 sind:

NECAR 2: (1996)

Antrieb:	2 Brennstoffzellenstacks zu je 25 kW Leistung Elektromotor mit Energierückführung
Tanksystem:	2*140 Liter komprimiertes Wasserstoffgas (250 bar) fassende Tanks zu je 80 kg im Dachaufbau
Höchstgeschwindigkeit:	110 km/h
Reichweite:	250 km
Gewicht:	2600kg (Vergleich Benzinfahrzeug der Serie ca. 2000 kg)
Bauart:	Prototyp auf Basis einer Mercedes V-Klasse

Auffällig ist vor allem die Reduzierung des Gesamtgewichtes im Vergleich zum Vorgänger von über einer Tonne.

Ebenfalls bemerkenswert ist, dass in diesem Fahrzeug die gesamte Brennstoffzellentechnik unter der Heckbank und Motorhaube Platz fand, was ermöglichte, dass der komplette Fahrgastraum zur Verfügung stand.

Problematisch waren die Wasserstofftanks, die in einem hohen Dachaufbau untergebracht werden mussten.

Aufgrund dieser Problematik entwickelte DaimlerChrysler mit dem NECAR 3 weltweit das erste Brennstoffzellenfahrzeug mit bordeigener Wasserstofferzeugung.
Die wichtigsten technischen Daten von NECAR 3 sind im folgenden aufgeführt.

NECAR 3: (1997)

Antrieb:	2 Brennstoffzellenstacks zu je 25 kW Leistung Asynchron-Elektromotor
Tanksystem:	Tank für 38 l Methanol Methanolreformer an Bord
Höchstgeschwindigkeit:	120 km/h
Reichweite:	400 km
Gewicht:	1750 kg (vergleichbares Benzinfahrzeug 1115 kg)
Bauart:	Prototyp auf Basis einer Mercedes A-Klasse

Durch die Verwendung von Methanol als Energieträger konnte der Serien-Treibstofftank anstelle der aufwändigen Wasserstofftanks verwendet werden. Dies ermöglichte die Unterbringung der gesamten Technik in einer A-Klasse. Neben Brennstoffzellen-System samt umfangreichem Reformer passten in das Testauto noch zwei Fahrgäste.

NECAR 4 basiert ebenso wie NECAR3 auf einer Mercedes A-Klasse. Die technischen Daten von NECAR 4 werden folgendermaßen in der Literatur veröffentlicht:

NECAR 4: (1999)

Antrieb:	2 Brennstoffzellenstacks zu je 35 kW Leistung Querliegender, die Antriebsachse umschließender Asynchronmotor
Tanksystem:	100 l Kryo-Tank für 5 kg Flüssigwasserstoff
Höchstgeschwindigkeit:	145 km/h
Reichweite:	450 km
Gewicht:	1750 kg (Vergleich Benzinfahrzeug der Serie ca. 1115 kg)
Bauart:	Prototyp auf Basis einer Mercedes A-Klasse

Auffällig ist die Leistungssteigerung der Brennstoffzellenstacks von 25 kW von NECAR 3 auf 35 kW bei NECAR 4. Dies bedeutet ein Leistungsplus von 40 Prozent. Eine weitere Veränderung ist die Umstellung des Energieträgers von Methanol auf flüssigen Wasserstoff.

Eine Weiterentwicklung des NECAR 4 ist NECAR 4 Advanced (1999). Die technischen Daten von NECAR 4 Advanced werden folgendermaßen in der Literatur veröffentlicht:

NECAR 4 Advanced: (1999)

Antrieb:	1 Brennstoffzellenstack mit 75 kW Leistung Querliegender, die Antriebsachse umschließender Asynchronmotor
Tanksystem:	Druckgastank für etwa 2 kg Wasserstoffgas bei 350 bar
Höchstgeschwindigkeit:	145 km/h
Reichweite:	250 km
Gewicht:	k.A.
Bauart:	Prototyp auf Basis einer Mercedes A-Klasse

Der wesentliche Unterschied zu NECAR 4 besteht darin, dass statt flüssigem Wasserstoff ein auf 350 bar komprimiertes Wasserstoffgas zum Einsatz kommt. Dies erklärt auch die wesentlich geringere Reichweite von 250 km des NECAR 4 Advanced. Eine weitere Neuerung ist, dass die Antriebseinheit nun aus einem einzigen 75 kW leistenden Brennstoffzellenstack besteht.

Mit dem NECAR 5 wurde 2000 der Nachfolger von NECAR 3 präsentiert. Die technischen Daten von NECAR 5 werden folgendermaßen in der Literatur veröffentlicht:

NECAR 5: (2000)

Antrieb:	1 Brennstoffzellenstack mit 75 kW Leistung Querliegender, die Antriebsachse umschließender Asynchronmotor
Tanksystem:	Tank für 38 l Methanol Methanolreformer an Bord
Höchstgeschwindigkeit:	150 km/h
Reichweite:	k.A.
Gewicht:	1450 kg (Vergleich Benzinfahrzeug der Serie ca. 1115 kg)
Bauart:	Prototyp auf Basis einer Mercedes A-Klasse

Die wesentliche Verbesserung gegenüber NECAR 3 bestand darin, das voluminöse Antriebssystem samt Methanol-Reformer um die Hälfte zu verkleinern und stark im Gewicht zu reduzieren. Die Vorteile davon sind, dass die beiden Systeme komplett im Sandwichboden der A-Klasse untergebracht werden können. So kann der gesamte Fahrgastraum genutzt werden. Des Weiteren führt die Gewichtsersparnis von rund 300 kg zu einer verbesserten Fahrdynamik.

Neben GM/Opel und DaimlerChrysler entwickeln alle großen Automobilhersteller Brennstoffzellenfahrzeuge.

Für die nun folgenden Hersteller konnten die technischen Daten der Fahrzeuge zusammengetragen werden, wobei die Dokumentation von Entwicklungsschritten nicht berücksichtigt werden kann.

7.3 Ford

Ford Focus FCV: (2001)

Die technischen Daten des Ford Focus FCV werden folgendermaßen in der Literatur angegeben:

Antrieb:	3 Brennstoffzellenstacks mit 25 kW Leistung Ecostar-Elektromotor
Tanksystem:	komprimiertes Wasserstoffgas (250 bar)
Höchstgeschwindigkeit:	130 km/h
Reichweite:	160 km
Gewicht:	1727 kg
Bauart:	Prototyp auf Basis eines Ford Focus

Ford Focus FC5: (2000)

Die technischen Daten des Ford Focus FC5 werden folgendermaßen in der Literatur angegeben:

Antrieb:	3 Brennstoffzellenstacks mit 25 kW Leistung Ecostar-Elektromotor
Tanksystem:	komprimiertes Wasserstoffgas (350 bar)
Höchstgeschwindigkeit:	130 km/h
Reichweite:	k.A.
Gewicht:	1769 kg
Bauart:	Prototyp auf Basis eines Ford Focus

P 2000 FC EV: (1999)

Die technischen Daten des Ford Focus FC EV werden folgendermaßen in der Literatur angegeben:

Antrieb:	3 Brennstoffzellenstacks mit 25 kW Leistung Ecostar-Elektromotor
Tanksystem:	komprimiertes Wasserstoffgas (350 bar)
Höchstgeschwindigkeit:	130 km/h
Reichweite:	k.A.
Gewicht:	1769 kg

P 2000 H2ICE: (2001)

Die technischen Daten des Ford Focus P2000 H2ICE werden folgendermaßen in der Literatur angegeben:

Antrieb:	Wasserstoffverbrennungsmotor
----------	------------------------------

4 Zylinder-Reihenmotor mit 2,0 l Hubraum
Tanksystem: 87 l Tank für komprimiertes Wasserstoffgas (259 bar)
Höchstgeschwindigkeit: k.A.
Reichweite: 100 km
Gewicht: k.A.

7.4 BMW

BMW 750hL: (1999)

Die technischen Daten des BMW 750 hL werden folgendermaßen in der Literatur angegeben:

Antrieb: Bivalenter Wasserstoffverbrennungsmotor (LH₂ und Benzin)
V12 Zylinder
5,4 Liter Hubraum
Tanksystem: 140 l Kryo-Tank für Flüssigwasserstoff
95 l Benzintank
Höchstgeschwindigkeit: 226 km/h
Reichweite: 350 km (LH₂); 650 km (Benzin)
Gewicht: 2250 kg
Bauart: Prototyp auf Basis eines 7er BMW

Die auf der langgestreckten Serienversion des 7er BMW basierenden BMW 750hL sind mit einem bivalenten Zwölfzylinder ausgestattet., der sowohl mit Wasserstoff als auch – aufgrund der fehlenden Wasserstoffinfrastruktur – mit Benzin betrieben werden kann.

BMW 745h: (2001)

Die technischen Daten des BMW 745 h werden folgendermaßen in der Literatur angegeben:

Antrieb: Bivalenter Wasserstoffverbrennungsmotor (LH₂ und Benzin)
V8 Zylinder
4,4 Liter Hubraum
Tanksystem: 140 l Kryo-Tank für Flüssigwasserstoff
88 l Benzintank
Höchstgeschwindigkeit: 215 km/h
Reichweite: 300 km (LH₂); 650 km (Benzin)
Gewicht: ca. 2000 kg
Bauart: Prototyp auf Basis eines 7er BMW

MINI Cooper Hydrogen: (2001)

Die technischen Daten des BMW MINI Cooper Hydrogen werden folgendermaßen in der Literatur angegeben:

Antrieb: Wasserstoffverbrennungsmotor
4 Zylinder Reihenmotor
1,6 Liter Hubraum
Tanksystem: Kryo-Formtank
Höchstgeschwindigkeit: k.A.
Reichweite: k.A.
Gewicht: ca. 1150 kg
Bauart: Prototyp auf Basis eines MINI Cooper

Im Gegensatz zu den bisherigen wasserstoffbetriebenen Fahrzeugen von BMW kommt im MINI Cooper Hydrogen erstmals ein sogenannter monovalenter (nur für einen Treibstoff geeigneter) Wasserstoff-Verbrennungsmotor zum Einsatz.

7.5 Toyota

Toyota FCHV-3: (2001)

Die technischen Daten des Toyota FCHV-3 werden folgendermaßen in der Literatur angegeben:

Antrieb: Hybrid-Antriebssystem bestehend aus einem Brennstoffzellenstack mit 90 kW Leistung, einem Elektromotor und einer Nickel-Metallhydrid-Batterie

Tanksystem: Metallhydridspeicher

Höchstgeschwindigkeit: 150 km/h

Reichweite: 300 km

Gewicht: k.A.

Toyota FCHV-4: (2001)

Die technischen Daten des Toyota FCHV-4 werden folgendermaßen in der Literatur angegeben:

Antrieb: Hybrid-Antriebssystem bestehend aus einem Brennstoffzellenstack mit 90 kW Leistung, einem Elektromotor und einer Nickel-Metallhydrid-Batterie

Tanksystem: Komprimierter Wasserstoff bei 250 bar

Höchstgeschwindigkeit: 150 km/h

Reichweite: 250 km

Gewicht: k.A.

Toyota FCHV-5: (2001)

Die technischen Daten des Toyota FCHV-5 werden folgendermaßen in der Literatur angegeben:

Antrieb: Hybrid-Antriebssystem bestehend aus einem Brennstoffzellenstack mit 90 kW Leistung, einem Elektromotor und einer Nickel-Metallhydrid-Batterie

Tanksystem: 35 l Benzintank
Benzin-Reformer

Höchstgeschwindigkeit: 150 km/h

Reichweite: 250 km

Gewicht: k.A.

7.6 Honda

Honda FCX-V3: (2000)

Die technischen Daten des Honda FCX-V3 werden folgendermaßen in der Literatur angegeben:

Antrieb: Brennstoffzellenstack mit 62 kW Dauerleistung

Tanksystem:	Wasserstoff-Gasdrucktank mit 100 l Fassungsvermögen bei 250 bar
Höchstgeschwindigkeit:	130 km/h
Reichweite:	180 km
Gewicht:	1750 kg

Honda FCX-V4: (2001)

Die technischen Daten des Honda FCX-V4 werden folgendermaßen in der Literatur angegeben:

Antrieb:	Brennstoffzellenstack mit 78 kW Dauerleistung
Tanksystem:	Wasserstoff-Gasdrucktank mit 130 l Fassungsvermögen bei 350 bar
Höchstgeschwindigkeit:	140 km/h
Reichweite:	300 km
Gewicht:	1740 kg

7.7 Mazda

Mazda Premacy FC-EV: (2000)

Die technischen Daten des Mazda Premacy FC-EV werden folgendermaßen in der Literatur angegeben:

Antrieb:	Ballard Mark 901 Stack Ecostar - Elektromotor
Tanksystem:	Methanoltank
Höchstgeschwindigkeit:	k.A.
Reichweite:	k.A.
Gewicht:	1850 kg

7.8 Volkswagen

Bora HyMotion: (2001)

Die technischen Daten des Bora HyMotion werden folgendermaßen in der Literatur angegeben:

Antrieb:	Brennstoffzellenstack Asynchron-Elektromotor
Tanksystem:	Kryotank für 50 l flüssigen Wasserstoff
Höchstgeschwindigkeit:	140 km/h
Reichweite:	350 km
Gewicht:	k.A.
Bauart:	Prototyp auf Basis eines VW Bora

8. Fahrzeugkonzepte-Busse

In diesem Abschnitt werden ausgewählte Brennstoffzellenbus-Konzepte vorgestellt. Im wesentlichen werden die technischen Daten der Bus-Konzepte hier aufgeführt.

8.1 Nebus (Daimler-Chrysler)

Der Brennstoffzellenbus NEBUS von Daimler Chrysler basiert auf dem Niederflur-Linienbus O405 N2.

Antrieb: 10 Brennstoffzellenstacks mit je 25 kW
Tanksystem: sieben 150-Liter- Druckflaschen (300 bar)
Höchstgeschwindigkeit: 80 km/h
Reichweite: 250 km
Gewicht: k.A.

Diese Daten können in der Literaturstelle [8] nachgelesen werden.

8.2 Citaro (Daimler-Chrysler)

Der Citaro ist der Nachfolger von Nebus. Die technischen Daten werden in der Literaturstelle [9] folgendermaßen angegeben.

Antrieb: Brennstoffzellenstack mit einer Gesamtleistung von 200 kW
Tanksystem: Druckgastank (350 bar)
Höchstgeschwindigkeit: 80 km/h
Reichweite: 200 km
Gewicht: k.A.

8.3 MAN Niederflurbus:

Die technischen Daten des MAN Niederflurbus werden in der Literatur [10] so angegeben.

Antrieb: 4 Brennstoffzellenmodule mit einer Gesamtleistung von 120 kW
Tanksystem: Druckgastank 1548 l Füllvolumen (250 bar)
Höchstgeschwindigkeit: k.A.
Reichweite: 250 km
Gewicht: ca. 18000 kg

Das Antriebskonzept des Brennstoffzellenbusses besteht aus folgenden Komponenten (Vergleiche auch Abbildung 12): Auf dem Dach befindet sich das Speichersystem für druckförmigen Wasserstoff. Im Heck sind die Brennstoffzellen integriert. Sie produzieren Gleichstrom, der in der Leistungselektronik auf dem Dach in Wechselstrom gewandelt wird. Zwei ebenfalls im Heck untergebrachte elektrische Antriebsmotoren sorgen für den Vortrieb.

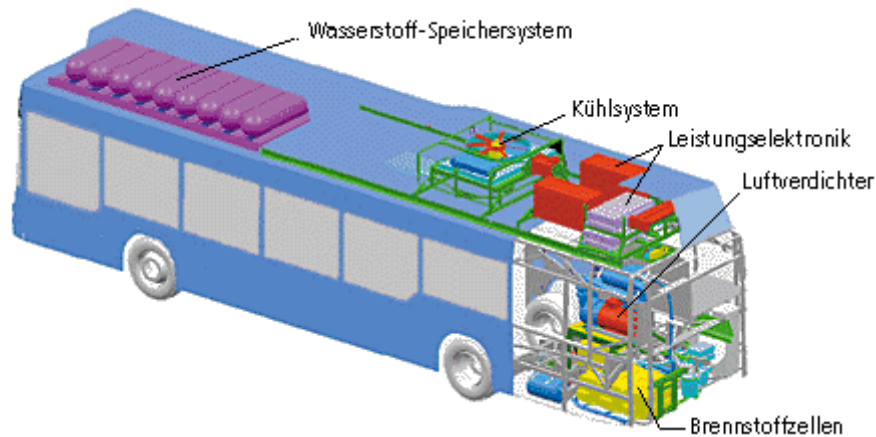


Abbildung 12: MAN Niederflurbus
Quelle: [15]

8.4 Neoplan 8008 FC:

Antrieb: 3 Brennstoffzellenstacks mit je 18 kW Leistung
Tanksystem: Leichtbau-Kunststoff-Druckbehälter mit Wasserstoff (250 bar)
Höchstgeschwindigkeit: k.A.
Reichweite: 350 km
Gewicht: ca. 12000 kg
Diese Angaben stammen aus der Literaturstelle [16].

Der Neoplan N 8008 FC ist ein Niederflurbus mit integrierter Brennstoffzelle und Antriebsbatterie. Der Bus eignet sich speziell für den Einsatz in speziell in Kur- und Innenstädten sowie Ballungsgebieten.

Am 14. Oktober 1999 war in Oberstdorf erstmals ein Linienbus mit Brennstoffzellenantrieb im fahrplanmäßigen Einsatz. Der NEOPLAN MIC N8008 bediente die autofreie Stadtkernzone des Allgäuer Luftkurortes. Nähere Angaben zu diesem Projekt sind der Literaturstelle [26] zu entnehmen.

9. Wirkungsgrade

Im folgenden werden die in der Literatur gefundenen Angaben über den Gesamtwirkungsgrad von Brennstoffzellen-Fahrzeugen zusammengefasst.

Abbildung 13 zeigt den charakteristischen Verlauf der Wirkungsgrade bei Antrieben mit Verbrennungsmotoren und Brennstoffzellen.

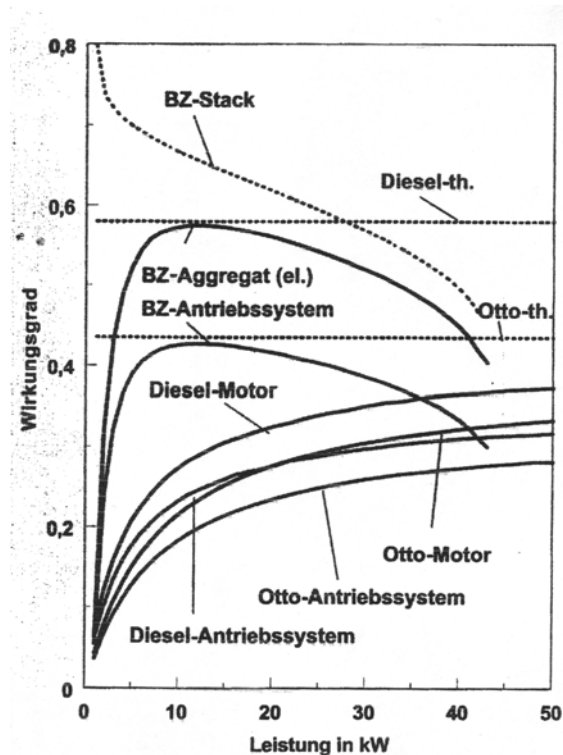


Abbildung 13: Charakteristischer Verlauf der Wirkungsgrade

In Abbildung 13 sind neben den jeweils erreichbaren Gesamtwirkungsgraden der Antriebssysteme sind auch die theoretischen Wirkungsgrade der Wandler angegeben (innere Wirkungsgrade der Verbrennungsmaschinen, Klemmenwirkungsgrad für die Brennstoffzelle). Für die Brennstoffzelle (BZ) wird ferner der typische Verlauf des Wirkungsgrades für das BZ-Aggregat, also nach Abzug der eigenen Versorgung (Verdichter, Pumpen, Lüfter), dargestellt.

Der zeitliche Verlauf der aufzubringenden Leistung des Antriebes wird durch den betrachteten Fahrzyklus bestimmt. Für Fahrsimulationen können Normfahrzyklen benutzt werden. Seit 1997 gilt der Fahrzyklus NEFZ (Neuer Europäischer Fahrzyklus).

In der Literaturstelle [16] sind Grafiken für den Energiefluss des Referenzfahrzeuges mit Ottoantrieb und mit Brennstoffzellenantrieb dargestellt.

Als Ergebnisse ergaben sich folgende Fahrzeuggesamtwirkungsgrade.

Ottomotor: 16%

Brennstoffzelle: 22%

Quelle: [16]

Der ermittelte Wirkungsgrad des Ottomotors wird von der Literaturstelle [17] annähernd bestätigt. Dieser gibt die Wirkungsgrade von zur Brennstoffzelle vergleichbaren Verbrennungsmotoren, mit etwa 16-18% bei der Benzinversion und mit etwa 22-24% bei der Dieselsonversion an.

Auch die in der Tabelle aufgeführten Wirkungsgrade bestätigen sowohl den beim Ottomotor als auch den bei der Brennstoffzelle bestimmten Wirkungsgrad im Prinzip.

Die Tabelle beinhaltet die in der Literaturstelle [25] angegebenen Wirkungsgrade verschiedener Fahrzeugtypen.

Fahrzeugtyp	Wirkungsgrad Treibstoff (%)	Wirkungsgrad Fahrzeug (%)	Gesamtwirkungsgrad (%)
Benzin (Verbrennungsmotor)	88	16	14
Diesel (Verbrennungsmotor)	88	19	19
Elektroauto (Strom aus thermischem Kraftwerk)	32	80	26
Elektroauto (Strom aus Wasserkraftwerk)	83	80	66
Hybridfahrzeug (Benzin/Strom)	88	30	26
Brennstoffzellenfahrzeug (Methanol)	50	48	24
Erdgas (Verbrennungsmotor)	91	16	15

Im speziellen Fall von NECAR 4 wird der Wirkungsgrad von DaimlerChrysler mit 36% am Rad angegeben. Er wurde nach dem neuen europäischen Fahrzyklus (NEFZ) gemessen. Dies bedeutet über ein Drittel der im Wasserstoff steckenden chemischen Energie wird in mechanische Energie umgewandelt.

Diese Angabe wird von der Literaturstelle [17] bestätigt, die den Wirkungsgrad von NECAR 4 mit 37,7% am Rad angibt. Dieser hohe Wirkungsgrad zeigt sich auch in dem ermittelten Verbrauch des Fahrzeugs, der trotz des erhöhten Fahrzeuggewichts lediglich 3,7l/100km Dieselequivalent beträgt.

Literaturverzeichnis

- [1] Diplomarbeit Alexander Jakovljevic; Auszug im Anhang A; Im Original bei Prof. Reich
- [2] Internet; www.inovation-brennstoffzelle.de; Auszug im Anhang B
- [3] Drucksache 14/5054 Deutscher Bundestag – 14. Wahlperiode; Auszüge im Anhang A, B, C, D, F, I
- [4] Internet; www.xcellsis.de;
- [5] Internet; www.hycar.de; Auszug im Anhang C
- [6] Internet; www.Hydrogen.org; Auszug im Anhang C
- [7] Brennstoffzellentechnologie; Energie für die Mobilität von morgen; Herausgeber Adam Opel AG; Bestellnummer: 0864153; Im Anhang
- [8] Kraftstoffalternativen für Brennstoffzellenfahrzeuge, EUROFORUM Fachkonferenz, 21./22.Januar 2000, Stuttgart; Auszug im Anhang E
- [9] Internet;
www.kubiss.de/bildung/projekte/schb_netz/b4_projekte/schueler/P2.../Seite2.ht; Auszug im Anhang E
- [10] Internet; www.hydrogeit.de/wassserstoff-kraftstoff.htm'48; Auszug im Anhang G
- [11] Internet; www.ph.tum.de/lehrstuehle/E19/th_eu_bza.html;
- [12] Internet; www.hycar.de/cars/.....htm; Auszüge im Anhang J, K, L, M
- [13] www.wes-^zeitung.de/Unterricht/Faecher/Chemie/Facharbeit%20Brennstoffzelle/Brennstoffzelle5.htm;
- [14] Internet; www.daimlerchrysler.com/news/top/2002/t20204a_g.htm; Auszug im Anhang F
- [15] Internet; www.brennstoffzellenbus.de/bus/bus.html; Auszug im Anhang N
- [16] MTZ Motortechnische Zeitschrift; Ausgabe 2/99; Auszug im Anhang F
- [17] Ledjeff-Hey/Mahlendorf/Roes, Brennstoffzellen; Entwicklung, Technologie, Anwendung; 2001, FH Bibliothek
- [18] DaimlerChrysler Informationsbroschüre „NECAR 4 – Fahrspaß ohne Emission“
Internet www.hycar.de/cars/necar4-story.htm; Auszug im Anhang K
- [19] Pischinger, S.; Verbrennungsmotoren - Vorlesungsumdruck; Band I; Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen
- [20] Zukunftstechnologie Brennstoffzelle; Forschungsverbund Sonnenenergie; Themen 1999-2000; Fernleihe FH-Bibliothek
- [21] Internet; www.diebrennstoffzelle.de/h2projekte/fahrzeuge/mehr_busse.shtml-7k-; Auszug im Anhang N
- [22] Daimler-Benz Pressemeldung, Mai 1997, Antriebe im Vergleich; Internet; www.hydrogeit.de/wassserstoff-kraftstoff.htm'48; Auszug im Anhang G
- [23] Internet; www.autointell.de/News-deutsch-2001/November-2001/November-28-01-p4.htm; Auszug im Anhang J
- [24] Internet; www.opel.ch/promo/index.cfm?mnu=00,08,10&lang=de; Auszug im Anhang J
- [25] Internet; www.e-mobile.ch/pdf/2002/EcoCarNews_1_d.pdf; Auszug im Anhang O
- [26] Internet; www.umweltfreundlich.de/index.shtml?daten; Auszug im Anhang N
- [27] Internet;
www.kubiss.de/bildung/projekte/schb_netz/b4_projekte/schueler/P2_2001/hybrid/; Auszug im Anhang H