

Kapitel: Alternative Fahrzeugkonzepte

Das Kapitel gibt einen Überblick über die Funktionsprinzipien und Konzepte alternativer Antriebe und stellt Beispielfahrzeuge vor. Der Schwerpunkt liegt auf Brennstoffzellenfahrzeugen.



Teil 1

Teil 2

Teil 3

Teil 4

Teil 5

Inhalte

1. Einführung: Europäische u. US-amerikanische Abgasgesetze.

2. Verbrennungsantriebe.

- ✓ Diesel- und Benzinmotor.
- ✓ Rotationskolbenmotor (Wankelmotor).

3. Hybridantriebe.

- ✓ Mild-Hybride.
- ✓ Voll-Hybride.
- ✓ Plug-In-Hybride.

4. Elektroantriebe.

- ✓ Batterien.
- ✓ Brennstoffzellen.

5. Brennstoffzellenfahrzeuge.

- ✓ Typen and Fahrzeugkonzepte.
- ✓ Komponenten.
- ✓ Wirkungsgrad.

EURO-Abgasnormen

Benzin (Emissionen in mg/km)

Benzinmotor	Euro 1	Euro 2	Euro 3	Euro 4	Euro 5	Euro 6
Implementierung	Juni 1992	Jan.1996	Jan.2000	Jan.2005	Sept.2009	Sept.2014
CO [mg/km]	3160	2200	2300	1000	1000	1000
HC [mg/km]	X	X	200	100	100	100
HC + NOx [mg/km]	1130	500	X	X	X	X
NOx [mg/km]	X	X	150	80	60	60
NMHC* [mg/km]	X	X	X	X	68	68

X: kein Grenzwert, *NMHC: Nichtmethankohlenwasserstoffe

Quelle:
Aigle/Krien/Marz
2007, 19

Diesel (Emissionen in mg/km)

Dieselmotor	Euro 1	Euro 2	Euro 3	Euro 4	Euro 5	Euro 6
Implementierung	Juni 1992	Jan.1996	Jan.2000	Jan.2005	Sept.2009	Sept.2014
CO [mg/km]	2720	100	640	500	500	500
HC + Nox [mg/km]	X	700/ 900*	560	300	230	170
NOx [mg/km]	X	X	500	250	180	80
PM [mg/km]	140	80/ 100*	50	25	5	5

X: kein Grenzwert, *Höhere Werte gelten für Markteinführung von Direkteinspritzungsmotoren

Quelle:
Aigle/Krien/Marz
2007, 19

Teil 1

Teil 2

Teil 3

Teil 4

Teil 5

EURO-Abgasnormen: Stickstoffoxide und Partikel

Teil 1

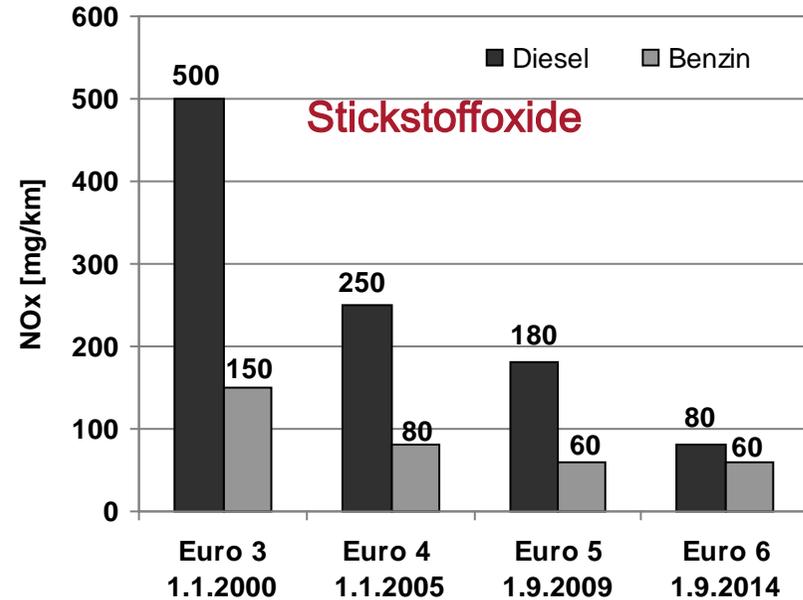
Teil 2

Teil 3

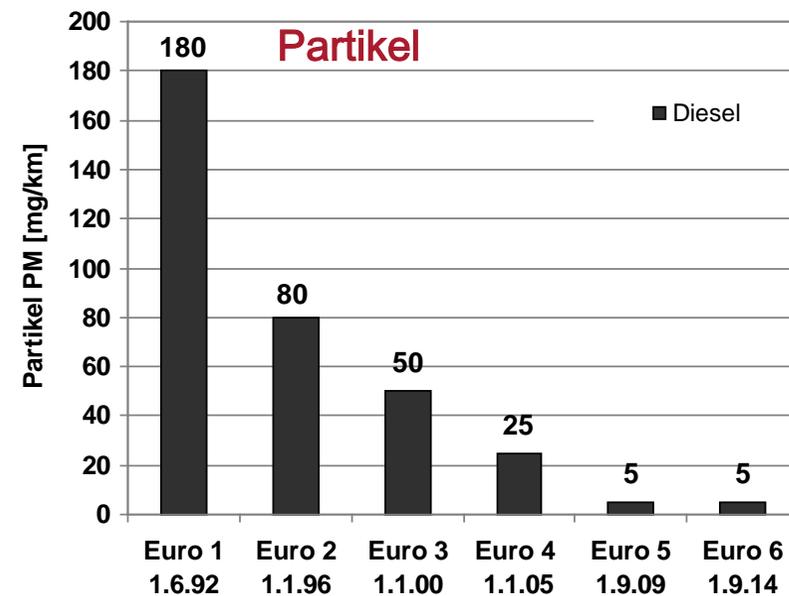
Teil 4

Teil 5

- ✓ No_x und Partikel sind Gesundheitsgefahren.
- ✓ Besonders Nanopartikel (PM) stehen im Verdacht, gefährlich zu sein.
- ✓ Dieselmotoren stoßen viel mehr NO_x u. Nanopartikel aus als Benzinmotoren.
- ✓ Partikelfilter und NO_x-Abgasnachbehandlungen sind Voraussetzungen für einen "sauberen" Diesel.
- ✓ Beschränkungen für ältere Dieselfahrzeuge in Stadtgebieten. (EU-Feinstaubdirektive)



Quelle: Aigle/Krien/Marx 2007,72



Quelle: Aigle/Krien/Marx 2007,77

Kaliforniens Low-Emission-Act

Teil 1

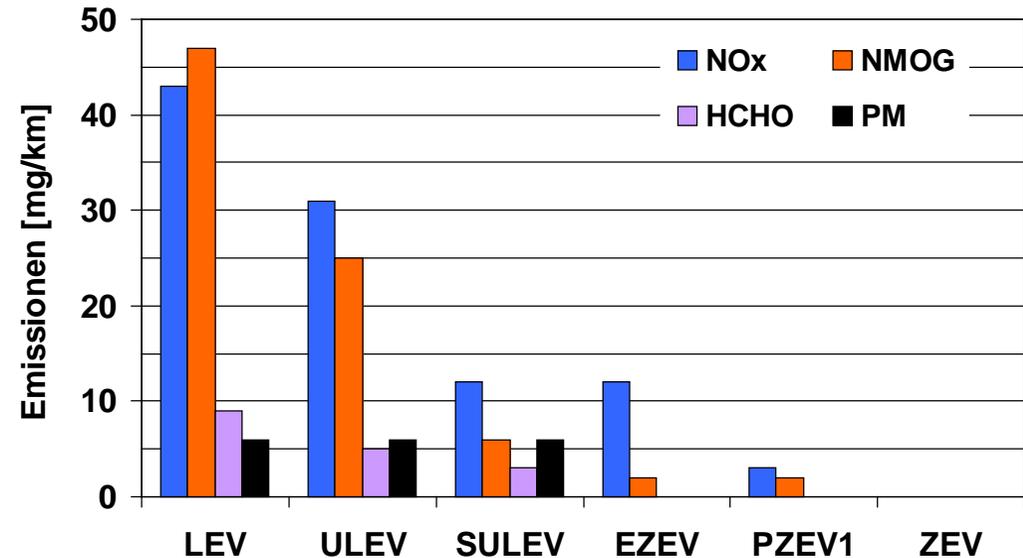
Teil 2

Teil 3

Teil 4

Teil 5

- ✓ Kalifornien hat das weltweit strengste Abgasgesetz.
- ✓ Kalifornien beansprucht einen Marktanteil von 4% auf emissionsfreie Fahrzeuge (ZEV).
- ✓ Auf Hybrid- und Erdgasfahrzeuge kann man Steuergutschriften erhalten.
- ✓ ZEV werden nur mit Brennstoffzellen und Batterien betrieben.
- ✓ Aber: Es gibt kein CO₂-Limit.
- ✓ Und: Die Produktion eines Treibstoffs erzeugt Abgase!.



Werte: Aigle/Krien/März 2007, 24
eigene Illustration

LEV - Low Emission Vehicle
ULEV - Ultra Low E. V
SULEV - Super Ultra Low E. V.
EZEV - Equivalent Zero E. V.
PZEV1 - Partial Zero E. V.
ZEV - Zero Emission Vehicle

Überblick Treibstoffe

Teil 1

Teil 2

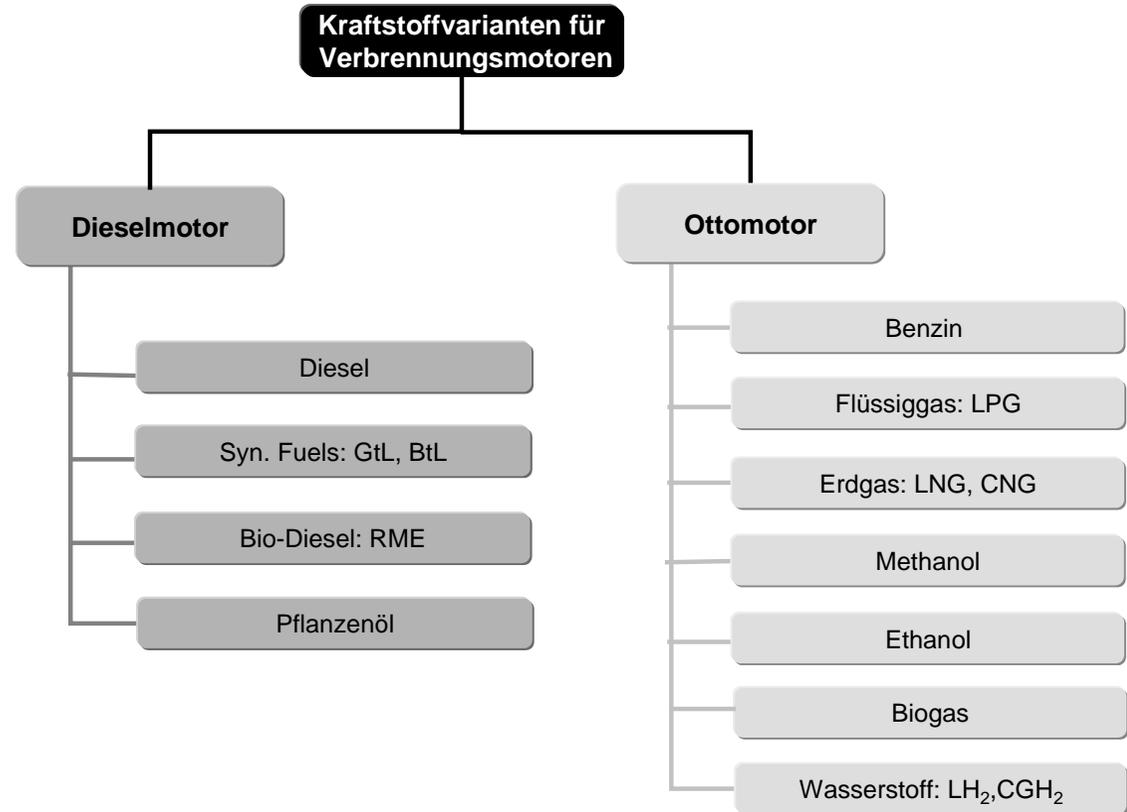
Teil 3

Teil 4

Teil 5

✓ Treibstoffe auf der linken Seite werden für Dieselmotoren genutzt.

✓ Treibstoffe auf der rechten Seite sind kompatibel mit Benzinmotoren.



Quelle:
Aigle/Krien/Marz
2007, 43

Ein Beispiel: DaimlerChrysler BlueTec. Sauberster Diesel aller Zeiten?

Teil 1

Teil 2

Teil 3

Teil 4

Teil 5

- ✓ Dieselmotor V6.
- ✓ Hubraum: 2987 ccm.
- ✓ Maximale Leistung: 154 kW.
- ✓ Maximales Drehmoment: 526 Nm.
- ✓ Treibstoffverbrauch: 7,0 l.
- ✓ Reichweite: 1200 km.
- ✓ Höchstgeschwindigkeit: 250 km/h.
- ✓ Beschleunigung: 0-100 km/h: 6.6 s.
- ✓ NOx-Abgasnachbehandlung (DeNOx).
- ✓ Preis: 39.780 EUR.



Mercedes E320 Bluetec
Einführung US-Markt im Jahr 2007,
(Zulassung in 45 Staaten)

Diskussion: Zukunft der Dieselmotoren?
Etablierte Technologie vs. Alternative Antriebe.

Teil 1

Teil 2

Teil 3

Teil 4

Teil 5

Der Wasserstoffverbrennungsmotor – Ein konventioneller Antrieb mit neuem Treibstoff

- ✓ Das Design eines H₂-Motors ähnelt einem Benzinmotor.
- ✓ Unterschiede resultieren aus den Eigenheiten von Wasserstoff; konstruktive Maßnahmen sind nötig, um Fehlzündungen zu vermeiden.
- ✓ Fahrzeuge mit einem H₂-Motor werden in Kalifornien als PZEV (Partial Zero Emissions Vehicle) eingestuft.
- ✓ NO_x-Emissionen entstehen durch Stickstoff im Verbrennungsgas.
- ✓ Der H₂-Motor ist weniger effizient als Brennstoffzellen.
- ✓ BMW plant 2008 den Test von 100 Fahrzeugen mit H₂-Motor (Hydrogen7).



Hydrogen7 von BMW
Quelle: BMW 2006

Diskussion: Für die meisten Fahrzeughersteller ist Wasserstoff in Kombination mit Brennstoffzellen das Konzept der Zukunft.
Wieso konzentriert sich BMW auf den H₂-Motor?

Teil 1

Teil 2

Teil 3

Teil 4

Teil 5

Rotationskolbenmotor: Funktionsprinzip

1954 Erster Motor:

- ✓ Felix Wankel.

Erster Einsatz

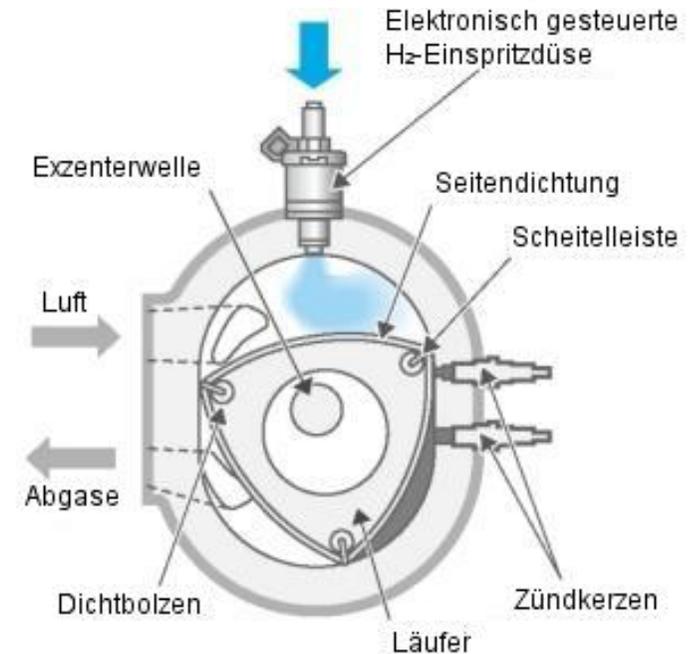
- ✓ Audi Ro80 (bis 1977).

Viertaktprinzip

- ✓ Aber: es wird ein Rotationskolben statt einem Linearkolben genutzt.

Hauptvorteil:

- ✓ kompaktes Design.



Quelle: HyCar 2006



Felix Wankel

Teil 1

Teil 2

Teil 3

Teil 4

Teil 5

Ein Beispiel: Mazdas RX-8 Hydrogen RE

Das letzte „Lebenszeichen“ des Wankelmotors?

- ✓ Zwei Rotationsmotoren.
- ✓ Bivalent: Benzin und Wasserstoff (CGH₂).
- ✓ Hubraum: 2x654ccm (1.308ccm).
- ✓ Maximale Motorleistung:
 - Max. Leistung Benzin: 154 kW.
 - Max. Leistung Wasserstoff: 80 kW.
- ✓ Drehmoment:
 - Benzin: 222 Nm.
 - Wasserstoff: 140 Nm.
- ✓ Tank:
 - Benzin: 61 Liter.
 - Wasserstoff: 110 Liter (bei 350 bar).
- ✓ Reichweite:
 - Wasserstoff: 100 km.
 - Benzin: 549 km.
- ✓ Höchstgeschwindigkeit: 170 km/h (H₂-Modus).
- ✓ Leergewicht: 1460 kg.
- ✓ Preis: Konzeptfahrzeug.



Mazda-RX8

Quelle: Mazda 2006

Hybridfahrzeuge

Teil 1

Teil 2

Teil 3

Teil 4

Teil 5

1902 Erfindung

- ✓ von Ferdinand Porsche.

1997 Erstes Fahrzeug in Massenproduktion

- ✓ Toyota Prius.

Heute:

- ✓ Toyota hat mehrere Hunderttausend "Prius II" weltweit verkauft. Vor allem in den USA und in Japan (siehe Abbildung).
- ✓ die meisten Fahrzeughersteller entwickeln Hybridfahrzeuge.

Grundidee:

- ✓ Unterstützung des Verbrennungsmotors durch einen Elektromotor.
- ✓ Speicherung elektrischer Energie in Batterien, z.B. Bremsenergie.

Wettlauf um den Markt für Hybridfahrzeuge

Produktion von Fahrzeugen mit Hybridantrieb



Quelle:
Manager-Magazin 2005

Hybridfahrzeuge: Prinzipien und Konzepte

Teil 1

Teil 2

Teil 3

Teil 4

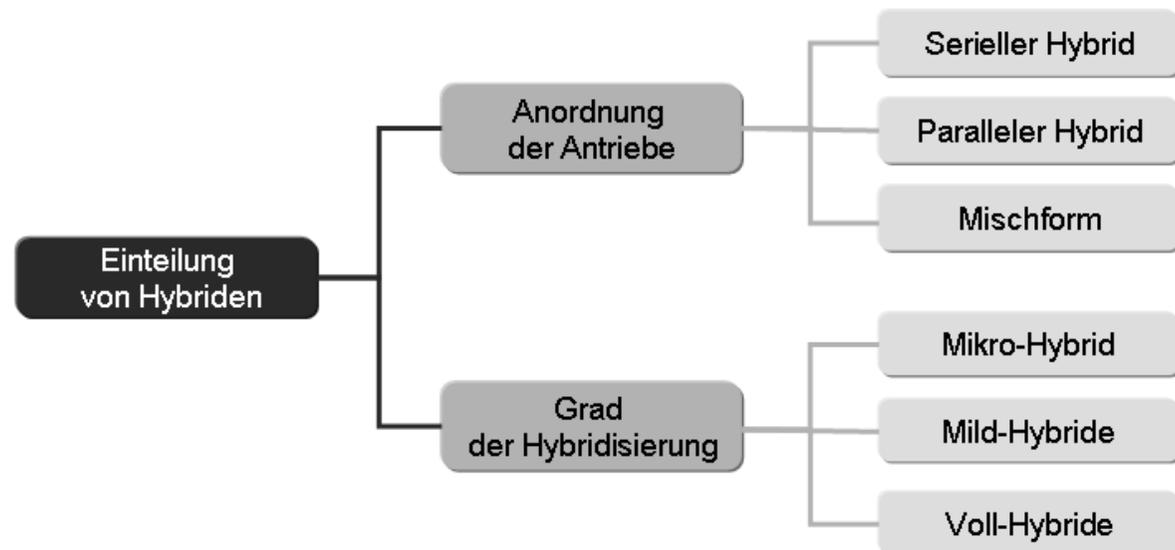
Teil 5

Verschiedene Arten v. Hybridfahrzeugen

- ✓ Mikro-Hybride: elektr. Start-Stopp-Automatik.
- ✓ Mild-Hybride: Rückgewinnung d. Bremsenergie.
- ✓ Voll-Hybride können im Elektromodus fahren.

Verschiedene Antriebsstrukturen

- ✓ Parallel-Hybride.
- ✓ Seriell-Hybride.

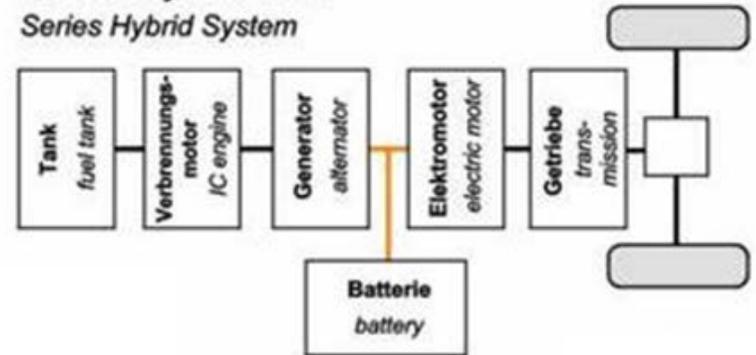


Quelle:
Aigle/Marz 2007, 65

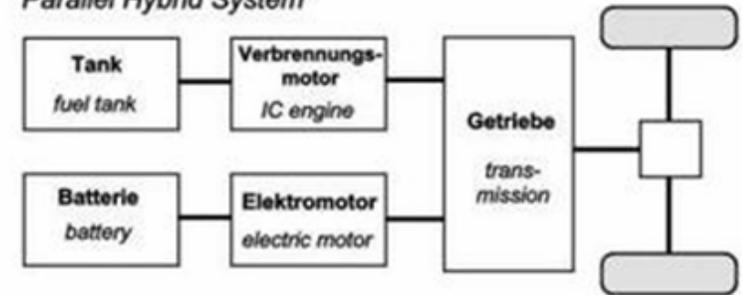
Parallel- und Seriell-Hybride

- ✓ In einem Parallelantrieb können Verbrennungs- und Elektromotor Kraft ans Getriebe übertragen.
 - Hauptvorteil: Beide Antriebe können simultan benutzt werden.
- ✓ In einem Seriell-Hybrid funktioniert der Verbrennungsmotor als Generator, um elektrische Energie zu produzieren. Nur der Elektromotor treibt das Getriebe an.
 - Hauptvorteil: Der Verbrennungsmotor kann immer mit gutem Wirkungsgrad laufen.
- ✓ In Mischantrieben, so genannten Seriell-Parallel-Antrieben, können beide Vorteile kombiniert werden.

Serieller Hybridantrieb
Series Hybrid System



Paralleler Hybridantrieb
Parallel Hybrid System



Quelle: Bady 2000

Teil 1

Teil 2

Teil 3

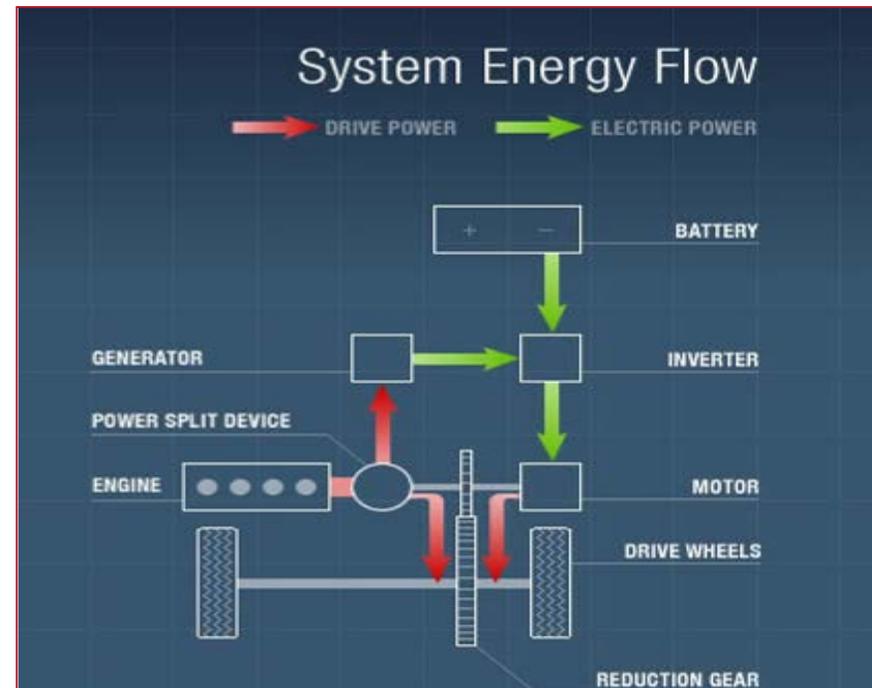
Teil 4

Teil 5

Ein Beispiel: Toyota Prius

Eine Erfolgsgeschichte "Made in Japan"

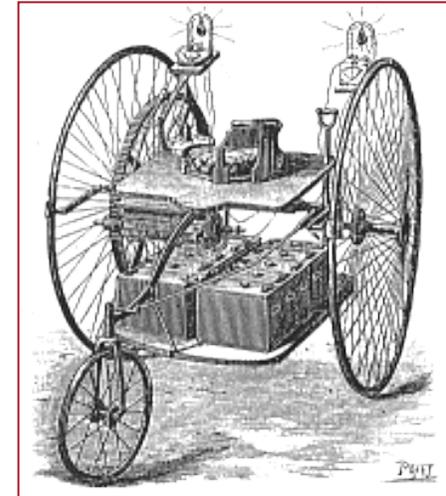
- ✓ Verbrennungsmotor: 4-Zylinder-Ottomotor:
 - Hubraum: 1497 ccm.
 - Nennleistung: 57 kW.
 - Nenndrehmoment: 115 Nm (bei 4000 U/min).
- ✓ Elektromotor: synchroner Wechselstrom-motor
 - Nennleistung: 50 kW.
 - Nenndrehmoment: 400 Nm (bei 1200 U/min).
- ✓ Batterie: Ni-MH.
- ✓ Treibstoffverbrauch: 4,3 Liter.
- ✓ Reichweite: 1050 km.
- ✓ Tank: 45 Liter.
- ✓ Höchstgeschwindigkeit: 170 km/h.
- ✓ Beschleunigung 0-100km/h: 10,9 sec.
- ✓ Leergewicht: 1400 kg.
- ✓ CO2-Emissionen: 104 g/km.
- ✓ Preis: 24.070€.



Quelle: Toyota 2006

Elektrische Fahrzeuge

- ✓ 1881 Erstes elektrisches Auto:
 - Gustav Trouvé.
- ✓ Ein Elektrofahrzeug erreichte 1889 als erstes Auto eine Höchstgeschwindigkeit von 100 km/h.
- ✓ Batteriearten:
 - Bleisäurebatterie.
 - neue Batteriearten.
- ✓ Arten von Elektromotoren:
 - Gleichstrom.
 - Wechselstrom.
- ✓ Elektromotoren haben hohe Wirkungsgrade und ein gutes Drehmoment bei niedrigen Umdrehungen.



Elektrofahrzeug von Trouvé

Quelle: Elektroauto-Tipp 2006

Überblick: Batterien

✓ Bleisäurebatterien:

- verbreitete Technologie, aber Energiedichte ist zu klein.
- begrenzte Reichweite, Batterien sind zu schwer.
- Autos spielen nur in best. Nischen eine Rolle (z.B. als Stadtauto).

✓ Neue Batterietechnologien:

- Nickel-Cadmium, Nickel-Metall-Hydrid, Lithium-Ionen
- Nur Energiedichte von Lithium-Ionen-Batterien ausreichend für gute Reichweiten. Das Elektroauto bewegt sich aus dem Nischendasein.
- Probleme: Kosten, Sicherheit und Lebensdauer.

Teil 1

Teil 2

Teil 3

Teil 4

Teil 5

Batterietyp		Leistungsdichte [W/kg]		Energiedichte [Wh/kg]		Lebensdauer [Jahre]		Kosten [EUR/kWh]	
		2006	2015	2006	2015	2006	2015	2006	2015
Blei-Säure	Pb	150-400 ¹ , < 250 ²	Kein Entwicklungsbedarf	20-30 ¹ 35 ²	< 40 ³	3 ¹ , 2-3 ²	< 3 ²	100 ^{1,2}	100 ^{1,2}
Nickel-Cadmium	Ni-Cd	80-175 ¹ 400 ²		40-60 ^{1,2}	< 60 ³	3 ¹ , 6 ²	6 ²	350 ^{1,2}	350 ²
Nickel-Metallhydrid	Ni-MeH	200-300 ¹ 400 ²		60-80 ^{1,2}	100 ³	5 ^{1,2}	5 ²	300 ¹ , 500 ²	300 ²
Natrium-Nickelchlorid	Na-NiCl ₂	155 ¹ , 200 ²		85- 100 ^{1,2}	k.A.	5 ^{1,2}	k.A.	300 ¹	k.A.
Lithium-Ionen	Li-Ion	300 ¹ , 400 ²		90-120 ¹ 140 ²	180 ³	5 ^{1,2}	10 ²	750 ³	300 ²

Ein Beispiel: Mitsubishi Lancer Evolution: Li-Ion-Batterien und Radnabenmotoren

Teil 1

Teil 2

Teil 3

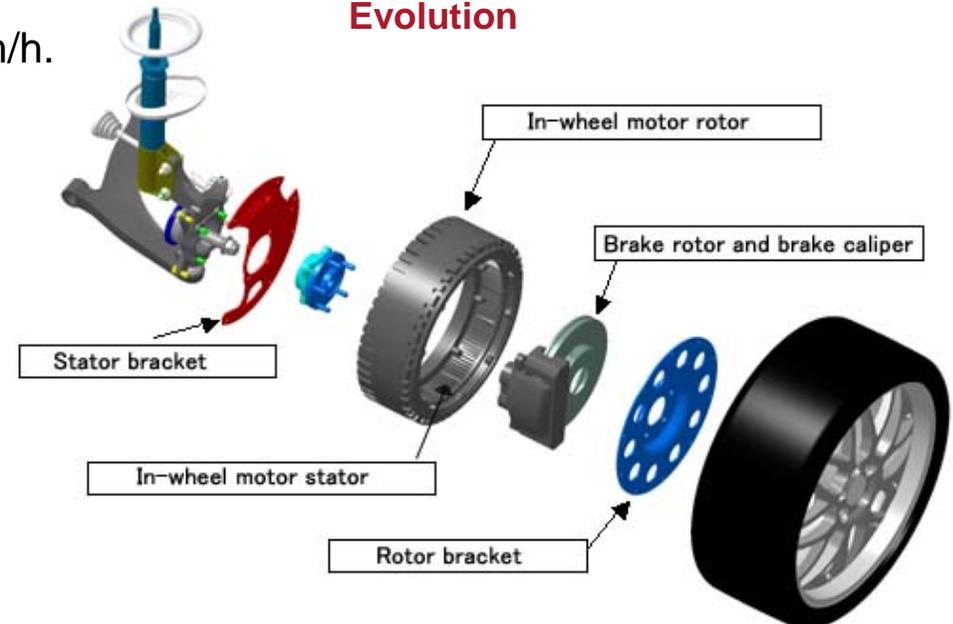
Teil 4

Teil 5

- ✓ Vier synchrone Radnabenmotoren.
- ✓ Max. Leistung: 50 kW.
- ✓ Max. Drehmoment: 518 Nm.
- ✓ Batterien: Li-Ionen:
 - Kapazität: 95 Ah.
 - Entladungsspannung: 336V.
 - Nennenergie: 32 kWh.
- ✓ Reichweite: 250 km.
- ✓ Höchstgeschwindigkeit: 180 km/h.
- ✓ Leergewicht: 1590 kg.
- ✓ CO₂-Emissionen: 0 (lokal).
- ✓ Preis: Prototyp.
- ✓ Serienproduktion für 2010 geplant.

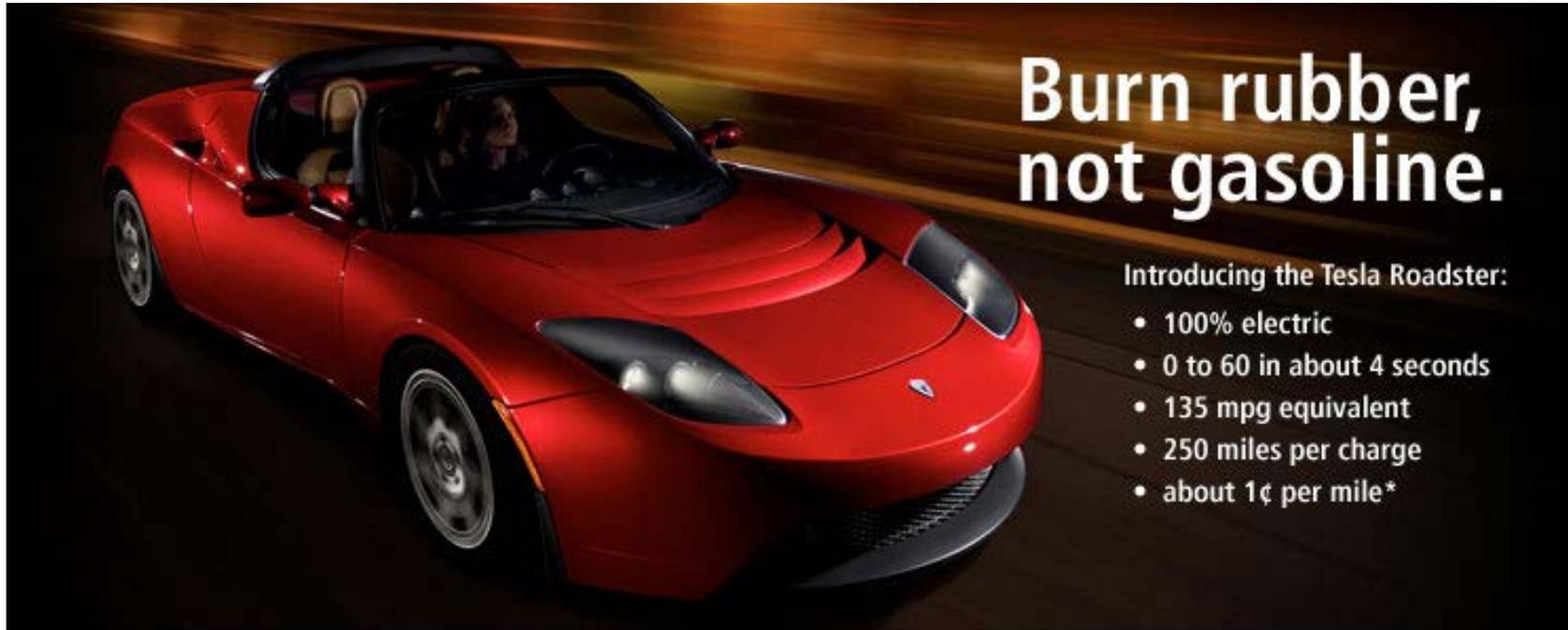


**Mitsubishi Lancer
Evolution**



Quelle: Mitsubishi 2005

Der Tesla Roadster



Quelle: Umweltbrief 2007

- ✓ 6831 wiederaufladbare Li-Ionen-Batterien werden im Tesla eingesetzt.
- ✓ Ladezeit der Batterien: 3,5 Stunden.
- ✓ Lebensdauer der Batterien reicht für 100.000 Meilen (161.000 km).

Neue Performance mit Li-Ionen-Batterien!

Teil 1

Teil 2

Teil 3

Teil 4

Teil 5

Brennstoffzellenfahrzeuge

Teil 1

Teil 2

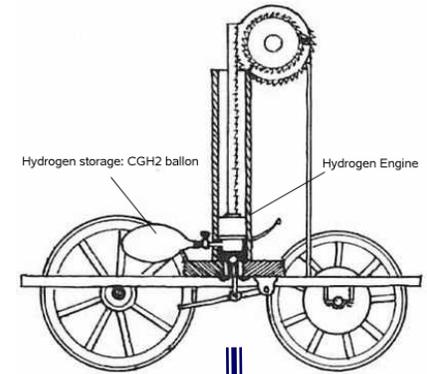
Teil 3

Teil 4

Teil 5

Geschichte der H₂-Fahrzeuge

- ✓ 1807: Erster H₂-Verbrennungsmotor von Francois Isaac de Rivaz.
- ✓ 1839: Entdeckung des Funktionsprinzips der Brennstoffzelle durch Sir William Grove.
- ✓ 1860: 1-Zylinder-Gasmotor von Jean Joseph Etienne Lenoir. Produktion von H₂ durch Elektrolyse „an Bord“.
- ✓ 1875-1890: Entwicklung des Viertakt-Verbrennungsmotor für flüssige Treibstoffe durch Otto, Benz und Daimler.
- ✓ 1933: Verbrennung von H₂ durch „An-Bord-Reforming“ von Ammoniak durch Norsk Hydro.
- ✓ 1967: Erstes mit Brennstoffzelle angetriebenes Elektroauto von General Motors
- ✓ 1970: Erstes Brennstoffzellen-Batterie-Hybridfahrzeug (Austin A40) mit Straßenzulassung von Karl Kordesch.
- ✓ 1970-1990: Weiterentwicklung des H₂-Verbrennungsmotors, insbesondere in Japan durch Musashi.
- ✓ Seit 1990: Systematische Entwicklung von Brennstoffzellenantrieben durch Mercedes-Benz, Toyota, Opel, Audi, Honda und Ford.
- ✓ 1994: Brennstoffzellen-Transporter Necar1 von DaimlerChrysler.
- ✓ Seit 2000: Feldversuche mit BZ-Fahrzeugen.
- ✓ 2003: Praxistest mit BZ-getriebenen „A-Klassen“ von DaimlerChrysler (weltweit 60 Autos).
- ✓ 2006: Deutsche Regierung investiert 500 Mio. Euro über 10 Jahre für Markteinführung von Brennstoffzellenfahrzeugen.



Einführung: BZ-Fahrzeuge

Brennstoffzellentypen

Teil 1

Teil 2

Teil 3

Teil 4

Teil 5

Typ	Elektrolyt	Temperaturbereich	Anwendungsgebiet*	
AFC	Alkaline FC / Alkalische BZ	Kalilauge	60 -90 °C	Raumfahrt, U-Boote, Straßenfahrzeuge
PEFC (PEM)	Polymere-Electrolyte-Membrane FC / Polymer-Elektrolyt--Membran BZ	Protonenleitende Membran	50 -80 °C *bis 160°C mit HT-PEM	Straßenfahrzeuge , Hausenergieversorgung, U-Boote, Kleingeräte
DMFC*	Direct-Methanol FC / Direktmethonal BZ	Protonenleitende Membran	80-110°C	Kleingeräte
PAFC	Phosphoric Acid FC / Phosphorsäure BZ	Konzentrierte Phosphorsäure	160-220°C	Gewerbliche KWK
MCFC	Molton Carbonate FC / Schmelzkarbonat BZ	Geschmolzene Karbonate	620°C-660°C	Gewerbliche KWK
SOFC	Solid Oxid FC / Oxidkeramische BZ	Ionenleitende Keramik	800-1000°C	Elektrizitätserzeugung, APU

Niedertemperatur-Brennstoffzellen

Hochtemperatur-Brennstoffzellen

Quelle: Jörisen/Garche 200,17. Eigene Ergänzungen

Einführung: Charakteristika von Brennstoffzellentypen

- Teil 1
- Teil 2
- Teil 3
- Teil 4
- Teil 5**

	AFC	PEFC / DMFC	PAFC	MCFC	SOFC
Temperatur	niedrig	<100°C		bis 1000°C	hoch
Kat. Material	edel	Platin		Metalle	weniger edel
Gasanforderung	Reinstgase	4-5.0 H ₂		C _n H _m	weniger rein
Zellwirkungsgrad	niedrig	40-50%		50-60%	hoch
Systemkomplexität	hoch	Reformer		Interne Ref.	niedrig
Start-Up-Time	sofort	Sekunden		Stunden	hoch
Dynamik	hoch				niedrig

Quelle: eigene Abbildung

Welcher Typ für welche Anwendung?



Goldene Regel:

Teil 1

Teil 2

Teil 3

Teil 4

Teil 5

Dynamische Lasten



- ✓ BZ-Fahrzeuge
- ✓ Mini-KWK-Geräte für Haushalte
- ✓ Portable Anwendungen
- ✓ Lastspitzenglättung, USV

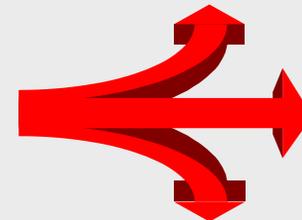


PEFC
(DMFC)

Kontinuierliche Lasten



- ✓ KWK-Einheit für industrielle Nutzung
- ✓ Grundlastanlagen



PAFC
MCFC
SOFC

Aber: Keine Regel ohne Ausnahme!

Konzepte für BZ-Fahrzeuge

Teil 1

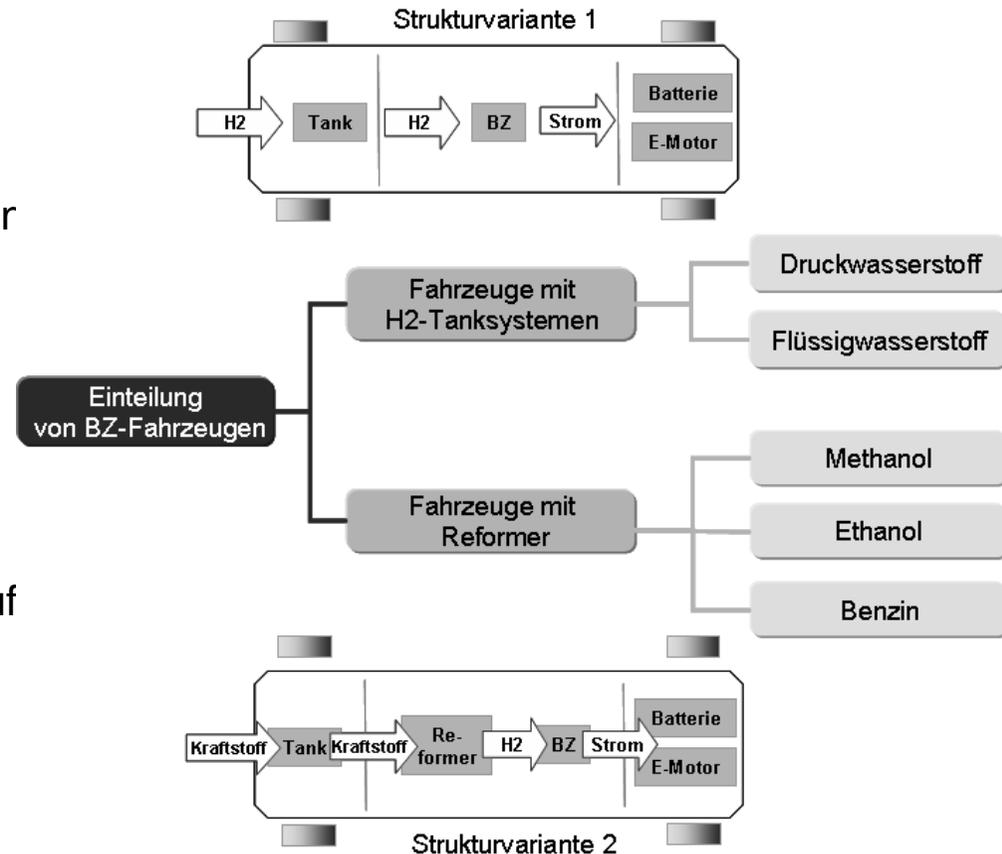
Teil 2

Teil 3

Teil 4

Teil 5

- ✓ DaimlerChrysler entwickelte einen Prototypen (Necar5) mit einem Methanol-an-Bord-Reformer.
- ✓ Daimler stoppte alle Bemühungen und verfolgte das Wasserstoffkonzept.
- ✓ Die meisten Fahrzeughersteller konzentrieren sich auf direkte Wasserstoffspeicherung.
- ✓ Die meisten Fahrzeuge nutzen Druckwasserstoff. Er kann bis auf 350 bar komprimiert werden. In naher Zukunft werden 700-bar-Tanks verfügbar sein.
- ✓ Flüssigwasserstoff wird in Kryogentanks gelagert. Wasserstoff verflüssigt sich bei -253°C .



Quelle: Aigle/Marz 2006, 85

Hauptkomponenten eines H₂-BZF

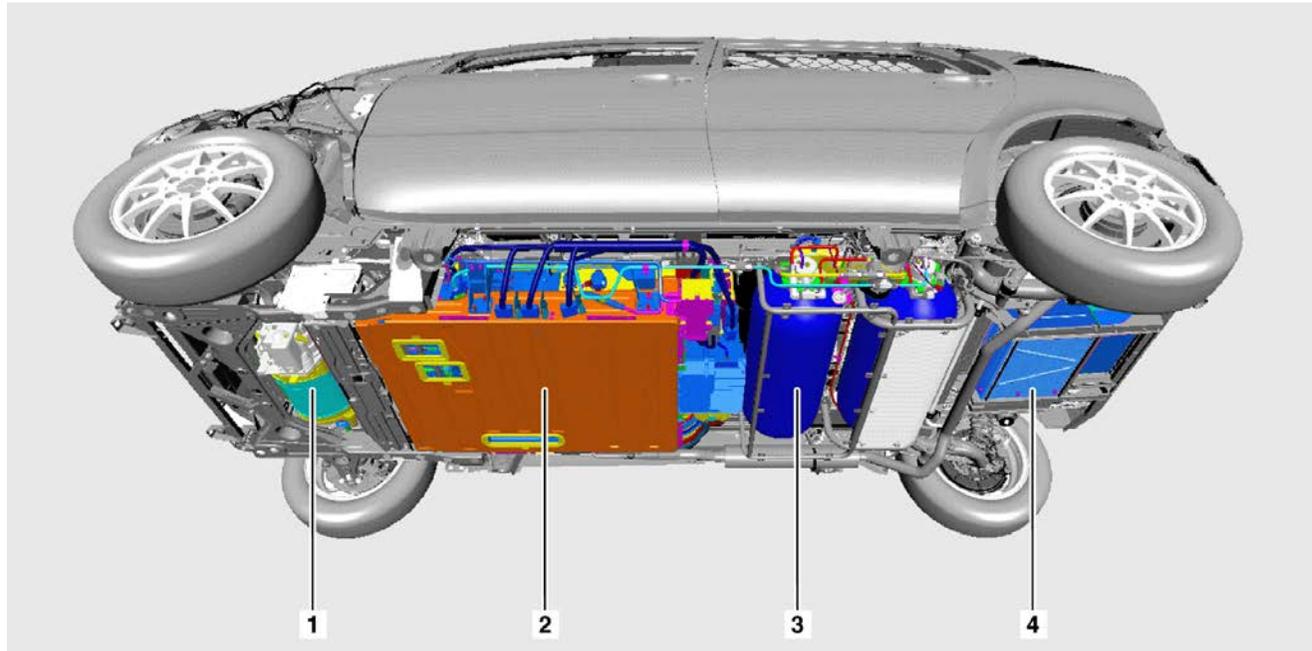
Teil 1

Teil 2

Teil 3

Teil 4

Teil 5



A-Klasse mit Brennstoffzelle von DaimlerChrysler

Quelle: Stauch 2005

- 1: Elektromotor.
- 2: Brennstoffzellensystem.
- 3: Hochdruckbehälter.
- 4: Hochspannungsbatterie.

Energiefluss in einem BZ-Fahrzeug

Teil 1

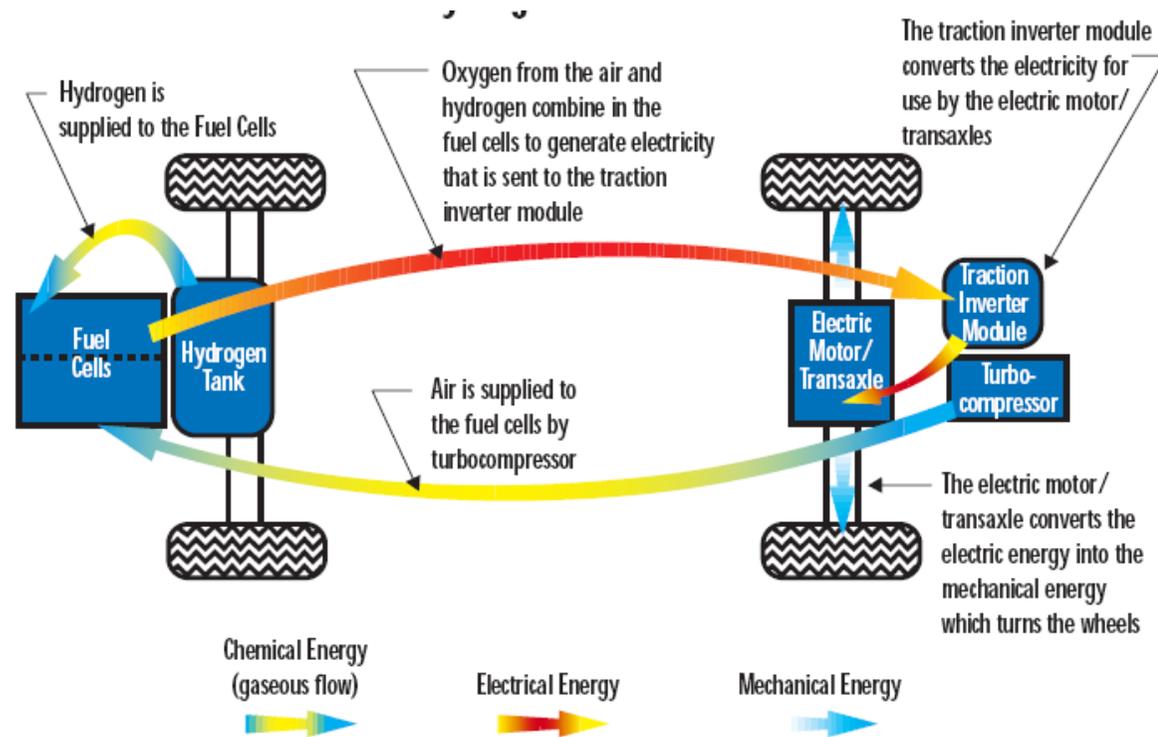
Teil 2

Teil 3

Teil 4

Teil 5

- ✓ In einem BZ-Fahrzeug wird die chemische Energie von H₂ in Elektroenergie umgewandelt.
- ✓ Ein Verbrennungsmotor wandelt die thermische Energie des Treibstoffs in mechanische Energie um (Carnot-Prozess).
- ✓ Verglichen mit dem Carnot-Prozess ist die elektrochemische Umwandlung effizienter.



Quelle: Los Alamos 1999, 5

Teil 1

Teil 2

Teil 3

Teil 4

Teil 5

Methanol-BZ-Fahrzeuge (NECAR V)

Spezifikationen der Treibstoffanlage

- ✓ Treibstoff: Methanol (CH₃OH).
- ✓ H₂-Durchsatz: 60 Nm³/h.
- ✓ Wirkungsgrad: 86%.
- ✓ Anlaufzeit: 1 min.
- ✓ Starten aus unter 0°C möglich.
- ✓ Lastspreizung: 1:40.
- ✓ Dynamik: 1,5 Sekunden (Leerlauf - 90 % Last).
- ✓ Berechnete Kosten: \$1.750 bei 100.000 Einheiten/a.
(oder \$3.550 bei 10.000 Einheiten/a).
- ✓ Abmessungen: 800x260x320 mm.
- ✓ Volumen / Gewicht: 65 Liter / 95 kg.

Spezifikationen des Brennstoffzellenantriebs

- ✓ Leistung: 75 kW el,brutto/ 60 kW el,netto.
- ✓ Emissionen: <SULEV.
- ✓ Volumen / Gewicht: 332 Liter / 385 kg.
- ✓ Systemnettowirkungsgrad: >40 %.



Quelle: Tillmetz/Benz 2006

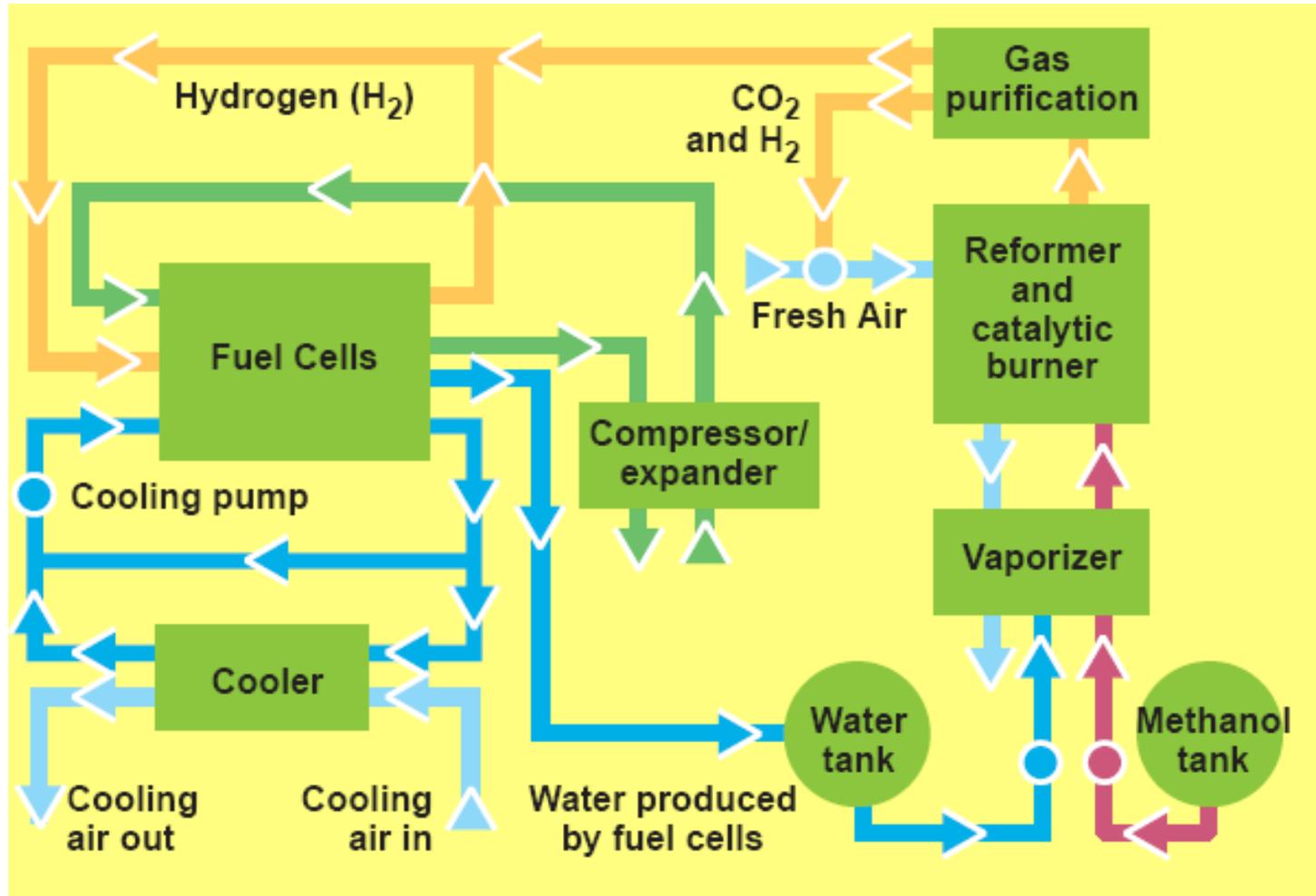


Quelle: Tillmetz/Benz 2006

Flussplan eines Methanol-BZF



- Teil 1
- Teil 2
- Teil 3
- Teil 4
- Teil 5**



Quelle: Los Alamos 1999, 16

Der Brennstoffzellen-Stack (Ballard)

Teil 1

Teil 2

Teil 3

Teil 4

Teil 5

- ✓ beeindruckende technische Errungenschaften über die letzten Jahre.
- ✓ Ballard ist der weltweit bekannteste Stack-Hersteller für Automobile.
- ✓ Hürden stellen Kosten, Lebensdauer und Kaltstart dar; aber nur ein „kleiner“ Abstand zur Leistung heutiger Verbrennungsmotoren.



Ballard MK902 Heavy Duty (HD)



Ballard MK902 Light Duty (LD)

	2002	2003	2004	2005	Ziel 2010
Leistungsdichte [W/l]	777	905	1205	1470	2500
Lebensdauer [h]	200	700	2000	2160	5000
Kaltstart, 50 % Leistung [s]	150 (bei 15°C)	50 (bei -15°C)	8 (bei -15°C)	16 (bei -20°C)	30 (bei -30°C)
Kosten [US\$/kW]	125	120	81	73	30

Werte: Budd 2006, 14-17, eigene Abbildung

Brennstoffzellensystem Xcellsis™HY-80

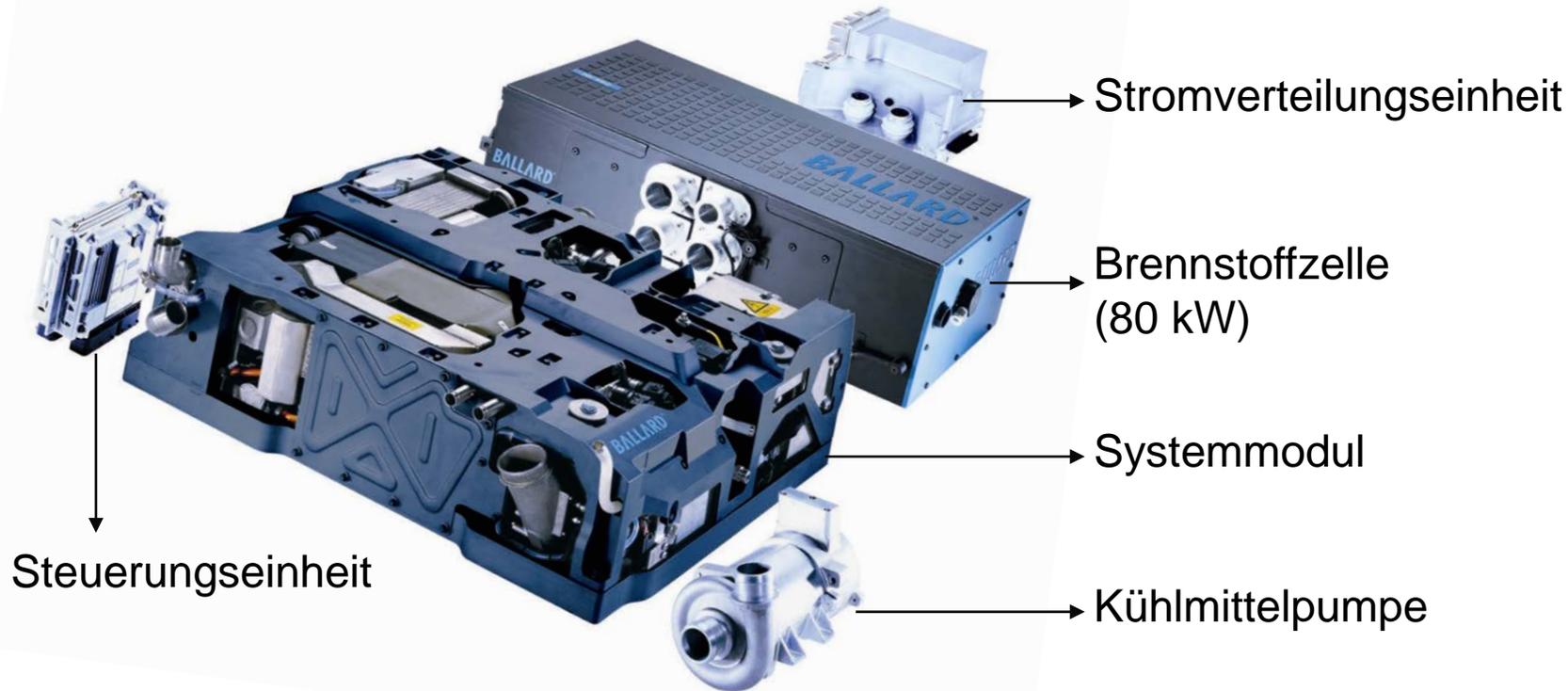
Teil 1

Teil 2

Teil 3

Teil 4

Teil 5



Quelle: Tillmetz/Benz 2006

Teil 1

Teil 2

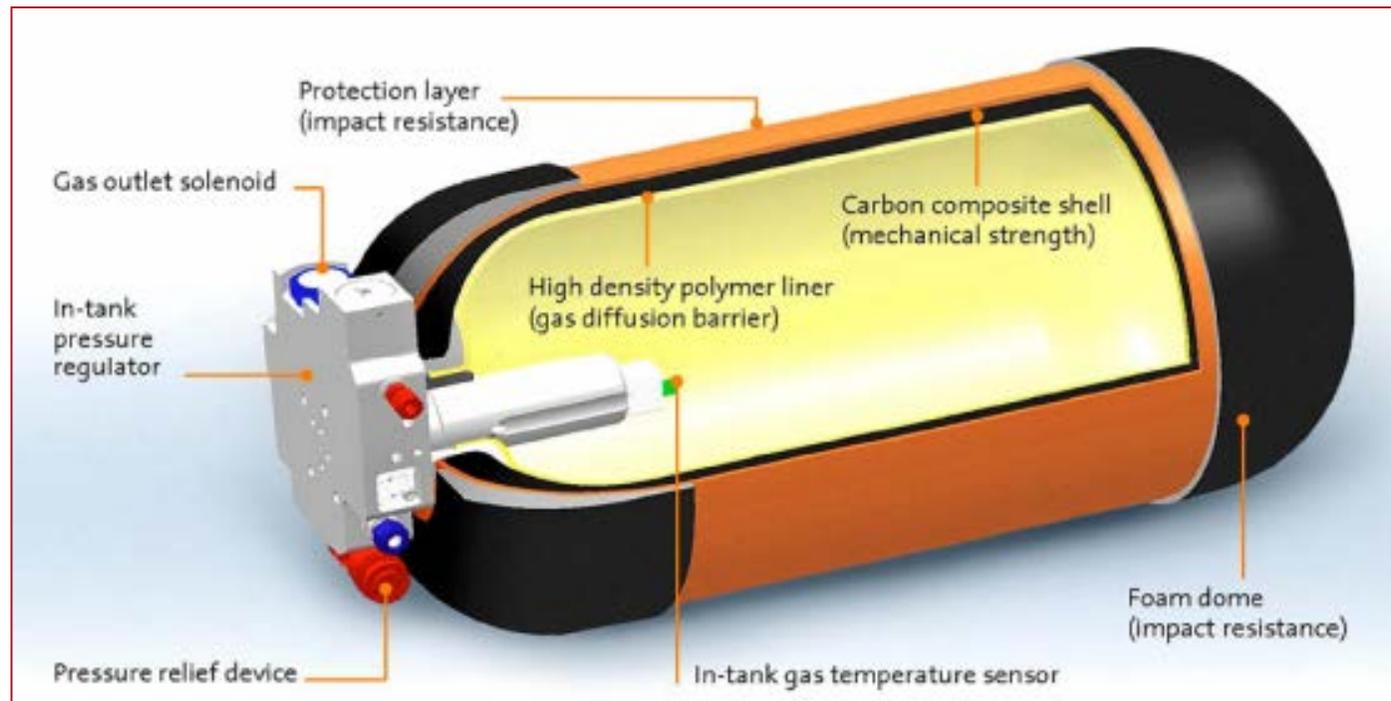
Teil 3

Teil 4

Teil 5

Tanksystem für komprimiertes Wasserstoffgas (CHG)

- ✓ CGH₂: komprimierter, gasförmiger Wasserstoff.
- ✓ Druck: 35-70 MPa bei Zimmertemperatur.
- ✓ 2 oder 3 Behälter können in einem Auto installiert werden; in Bussen bis zu 8 Behältern.
- ✓ Reichweite liegt zwischen 200 km (350 bar) und 500 km (700 bar).



Quelle: Helholt/Eberle 2007, 837

Tanksystem für Flüssigwasserstoff (LH₂)

Teil 1

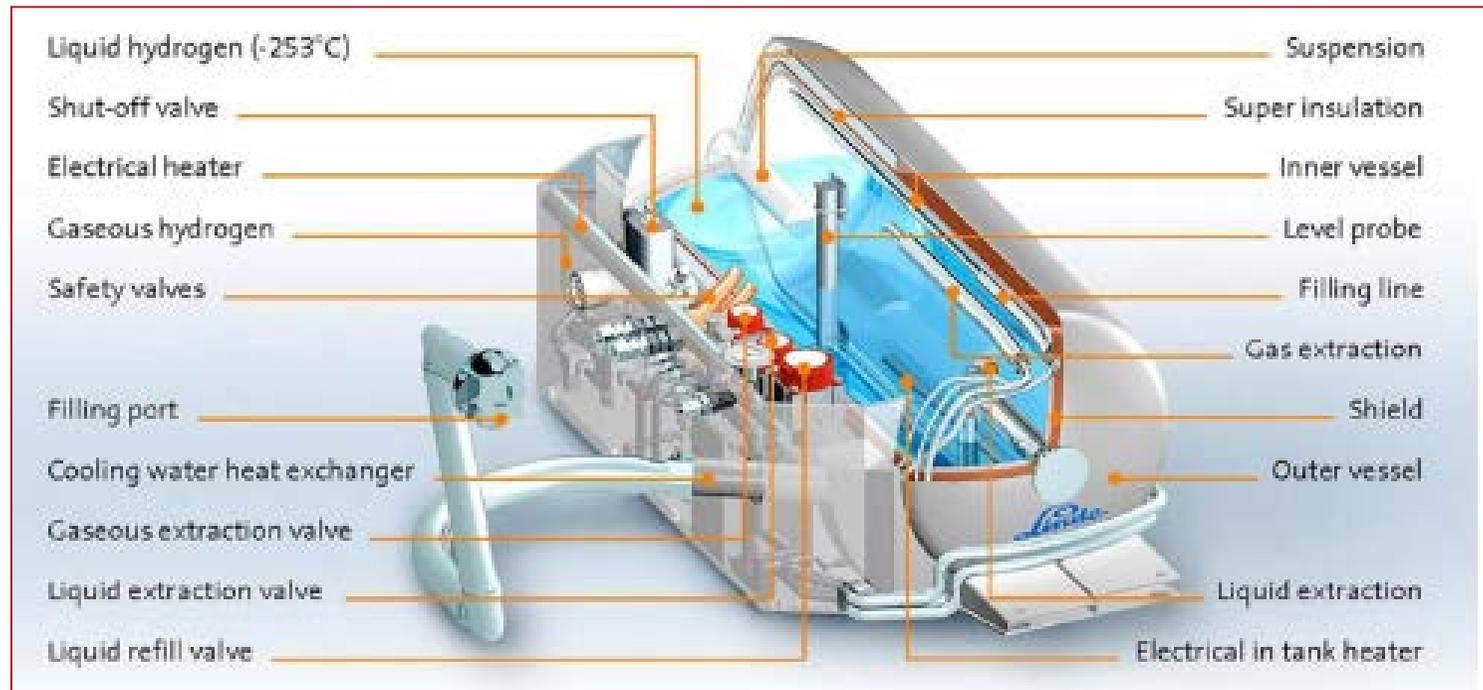
Teil 2

Teil 3

Teil 4

Teil 5

- ✓ Arbeitstemperatur innerhalb von 20 und 30 K bei 0,5 bis max. 1 MPa Druck.
- ✓ Problem: Unvermeidbare Wärmeabfuhr durch.
 - Wärmeleitung.
 - Konvektion.
 - Wärmestrahlung.
- ✓ eine effiziente, mehrschichtige Vakuum-Superisolation ist erforderlich (zirka 40 Schichten Metallfolie).
- ✓ Abdampfverluste nach mehreren Tagen.
- ✓ Energie zur Verflüssigung von Wasserstoff verbraucht 30% der gespeicherten chemischen Energie.



Teil 1

Teil 2

Teil 3

Teil 4

Teil 5

Ein Beispiel: DaimlerChryslers F-Cell

- ✓ Drei-Phasen-Asynchron-Motor:
 - Nennleistung: 65 kW.
 - Nenndrehmoment: 210 Nm.
- ✓ Brennstoffzellensystem:
 - PEFC Ballard Mark 902.
 - Nennleistung: 85 kW.
- ✓ Batterien:
 - NiMh 20 kW
- ✓ Tank
 - CGH₂ bei 350bar: 1,8 kg
- ✓ Verbrauch: 4,2 l Diesel äquivalent
- ✓ Reichweite: 160 km
- ✓ Höchstgeschwindigkeit: 145 km/h
- ✓ Beschleunigung: 16 s
- ✓ Preis: Prototyp
 - Feldversuch mit 60 Autos seit 2002



F-Cell DaimlerChrysler



Nur Wasser!

Teil 1

Teil 2

Teil 3

Teil 4

Teil 5

GMs Chevrolet Equinox Fuel Cell

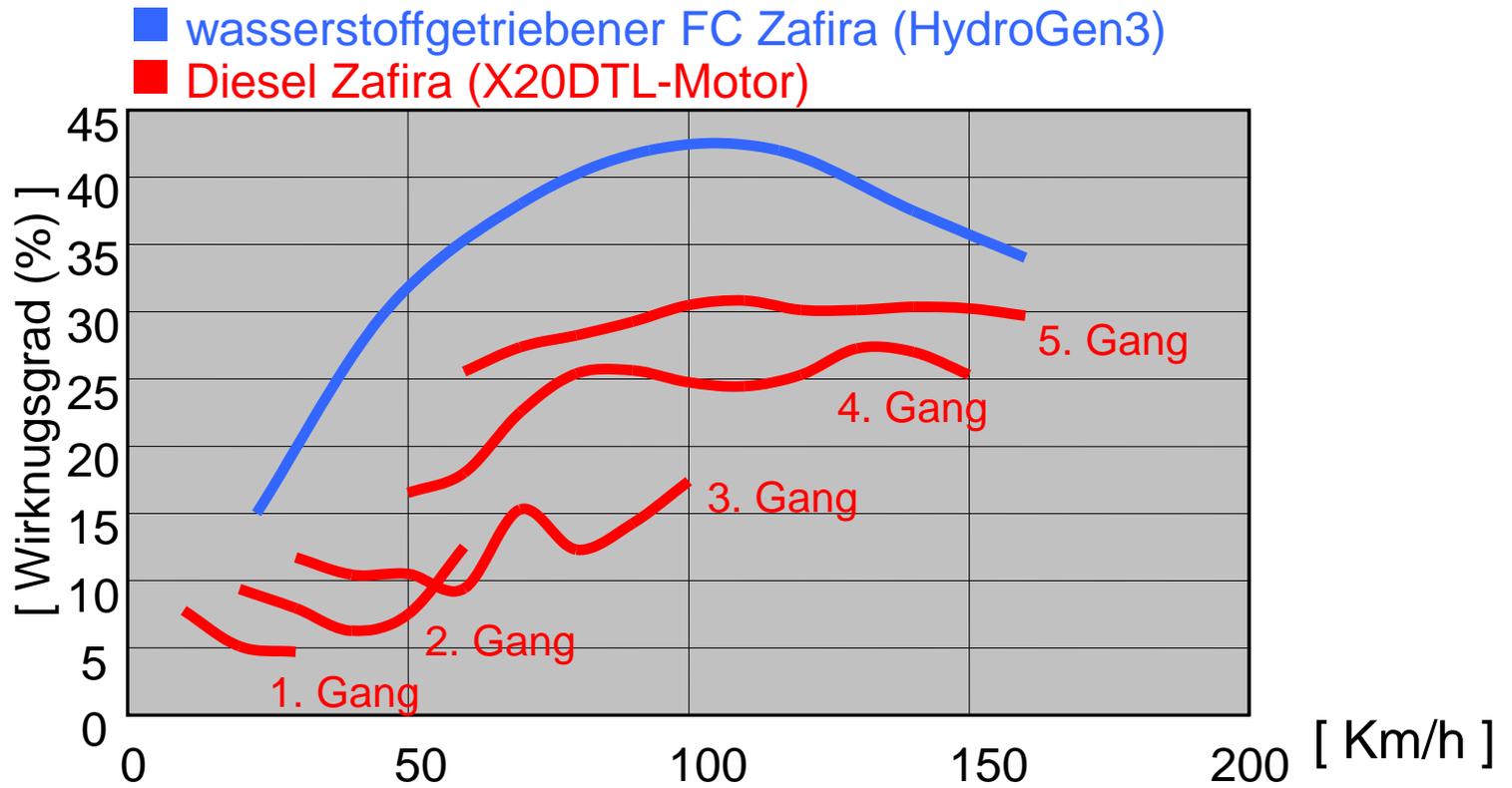
- ✓ Elektrischer Antrieb
 - Drei-Phasen-Asynchron-Motor:
73 kW (max. 94 kW)
 - Nenndrehmoment: 320 Nm
- ✓ Brennstoffzellensystem
 - Stack: 440 Zellen, 93 kW.
 - NiMH-Batterie 35 kW.
 - Lebensdauer: 2,5 Jahre, 80.000 km.
 - Betriebstemperatur: -25 bis +45°C.
- ✓ Treibstoffspeicherung:
 - 3 CGH₂-Behälter.
 - 70 MPa.
 - 4,2 kg Wasserstoff.
- ✓ Leistungsfähigkeit:
 - Beschleunigung: 0-100 km/h in 12 s.
 - Höchstgeschwindigkeit: 160 km/h.
 - Reichweite: 320 km.
- ✓ Leergewicht: 2010 kg.



Fig. 12. The Chevrolet Equinox Fuel Cell, a five-door front-wheel drive SUV.

Quelle: Helmolt/Eberle 2007, 842

Vergleich der Wirkungsgrad und CO₂-Emissionen



→ **Durchschnittlicher Wirkungsgrad (Europäischer Fahrzyklus):**

Wirkungsgrade: **36 % / 22 %**

CO₂-Emissionen (direkt): **0 g/km / 177 g/km**

Quelle: Hermann/Winter 2003

Teil 1

Teil 2

Teil 3

Teil 4

Teil 5

Gesamtwirkungsgrad BZF (Beispiel DC)

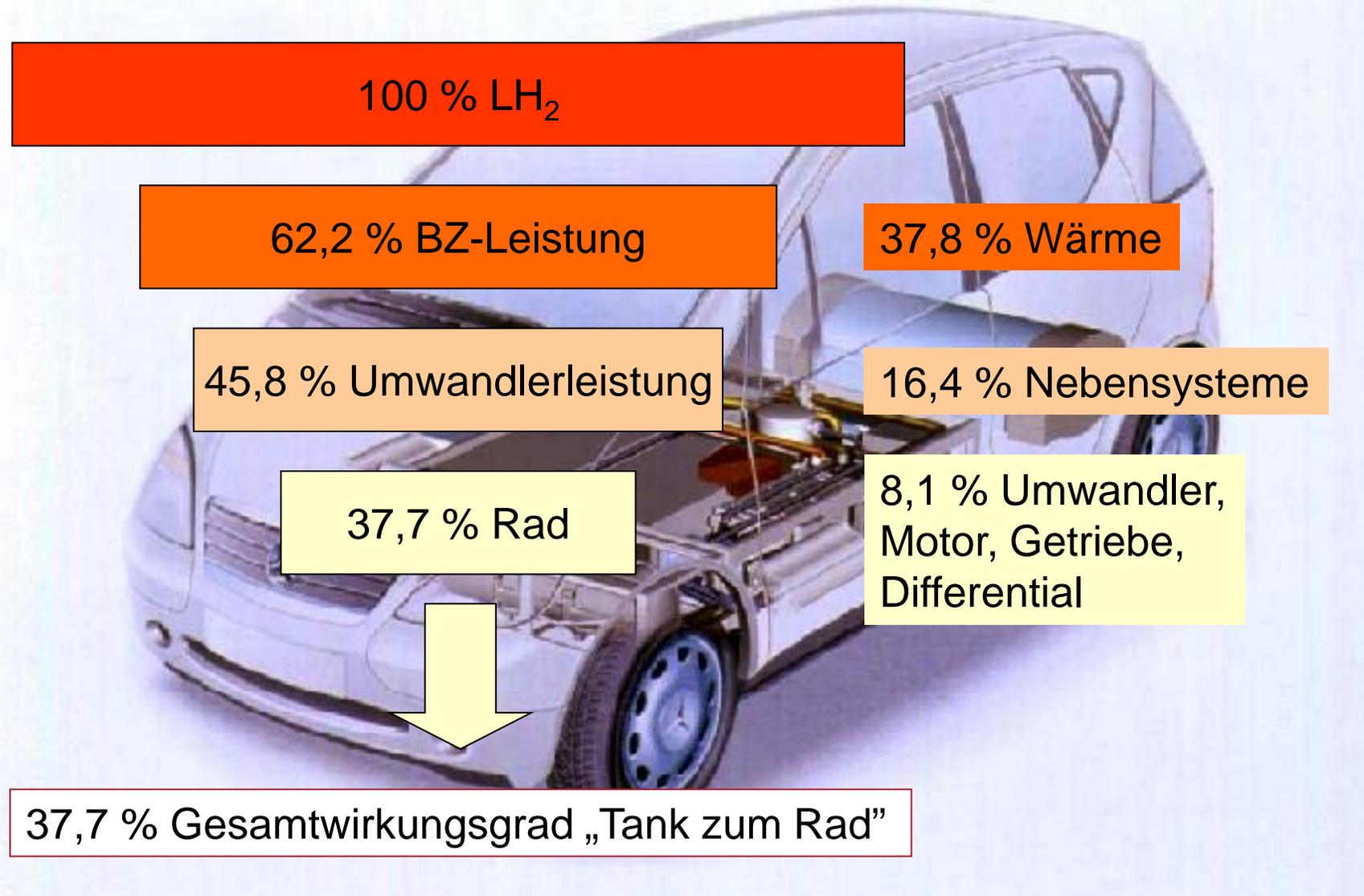
Teil 1

Teil 2

Teil 3

Teil 4

Teil 5

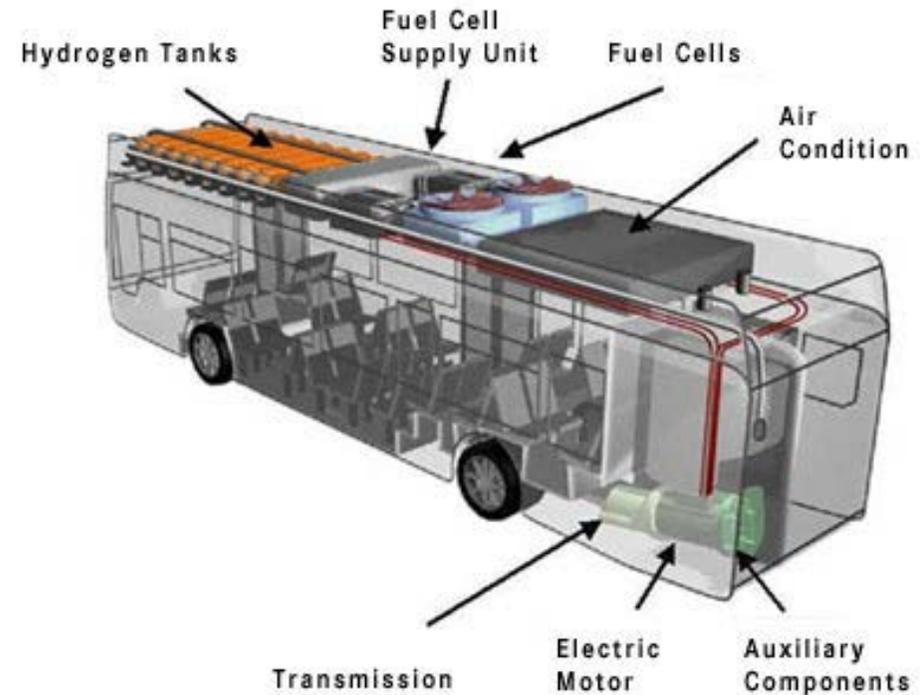


Brennstoffzellenbusse

- ✓ DaimlerChryslers "Citaro-Bus" basiert auf der Brennstoffzellentechnologie.
- ✓ 27 Citaro-Busse wurden zwischen 2003 und 2005 in 9 europäischen Städten getestet.
- ✓ Stack-Technologie von Ballard:
 - Zwei Module "MK902 Heavy Duty" mit 300 kW.
- ✓ Tanksystem:
 - 9 CGH₂-Behälter mit 350 bar können 1845 Liter speichern.
- ✓ Reichweite:
 - 200 bis 250 Kilometer.
- ✓ Höchstgeschwindigkeit:
 - ca. 80 Kilometer.



BZ-Bus „Citaro“



Quelle: Fuel Cell Bus Club 2004

H₂-Tankstellen - weltweit

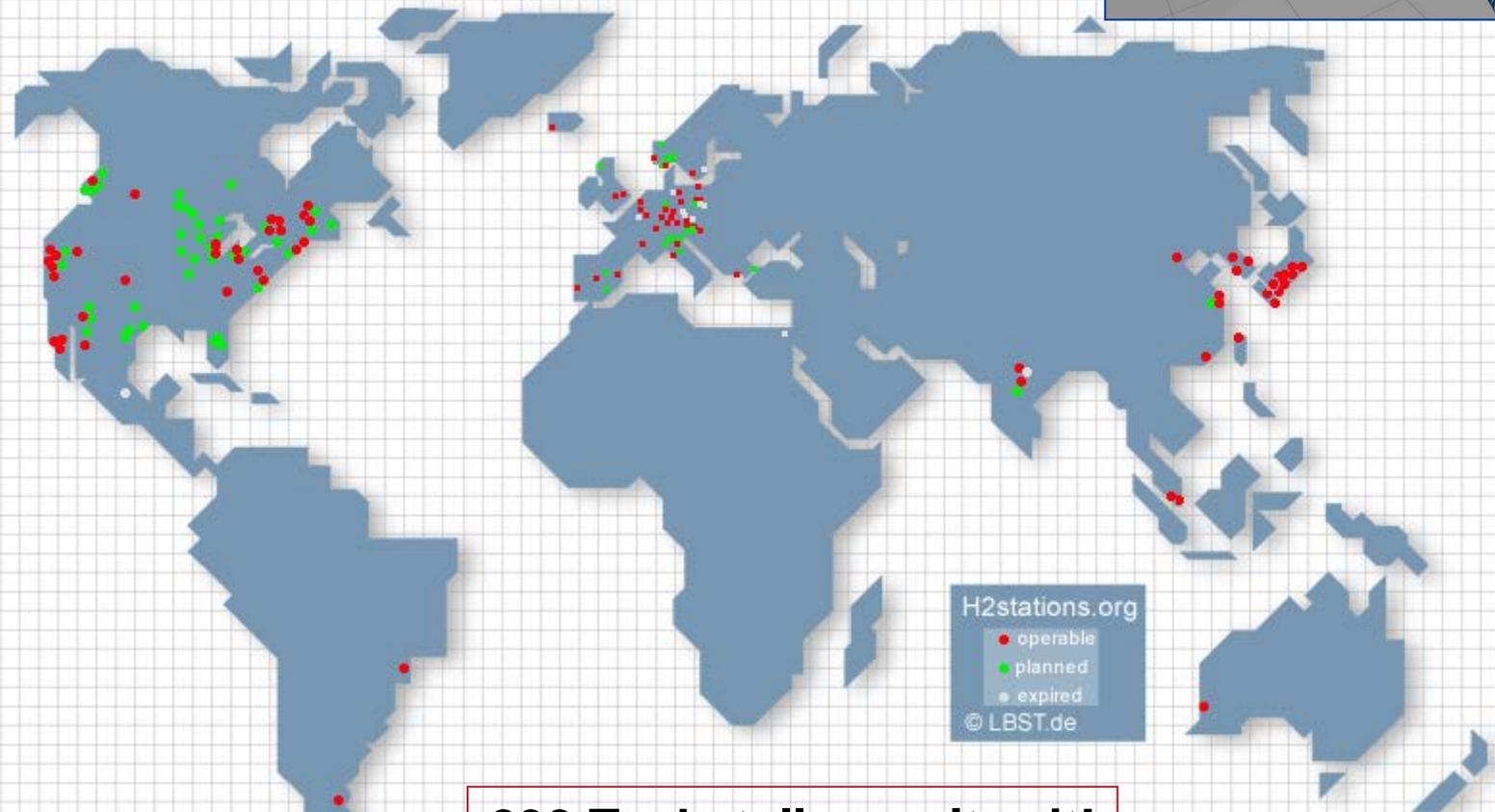
H₂ Stations
.org

Hydrogen Filling Stations Worldwide

Hyd



Where to fill up your hydrogen car!



Teil 1

Teil 2

Teil 3

Teil 4

Teil 5

Quelle: H2stations.org aus
LBST (LBST 2007)

299 Tankstellen weltweit!

H2-Tankstellen – Europa

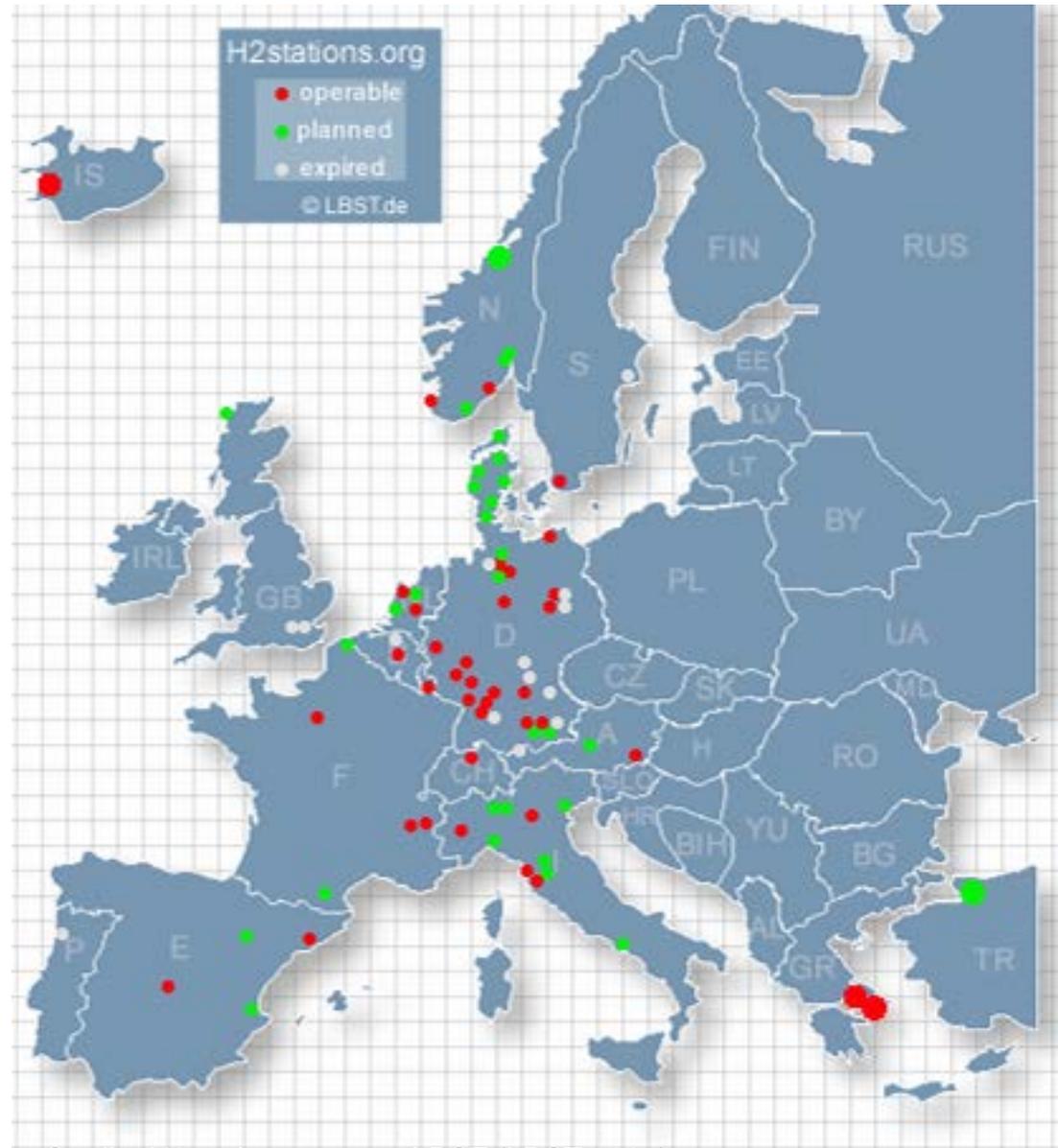
Teil 1

Teil 2

Teil 3

Teil 4

Teil 5



Quelle: H2stations.org von LBST (LBST 2007)

Quellen I

Teil 1

Aigle, Thomas; Marz, Lutz (2007a): Automobilität und Innovation. Versuch eine interdisziplinären Systematisierung. Discussion Paper SPIII 2007-102. Wissenschaftszentrum für Sozialforschung Berlin.

Teil 2

Aigle, Thomas; Krien, Philipp; Marz, Lutz (2007): Die Evaluations-Matrix. Ein Tool zur Bewertung antriebs- und kraftstofftechnologischer Innovationen in der Automobilindustrie. Discussion Paper SPIII 2007-105. Wissenschaftszentrum für Sozialforschung Berlin.

Teil 3

Bady, Ralf (2000): Hybrid-Elektrofahrzeuge – Strukturen und Entwicklungen. Vortrag, 6. Symposium Elektrische Straßenfahrzeug. Technische Akademie Esslingen.

Teil 4

Budd, Geoff (2006): A fuel cell bus project for Europe – Lessons learned from a fuel cell perspective. Vortrag, CUTE-Abschlusskonferenz. 22.5.2006, Hamburg.

Teil 5

BMW (2006a): Der BMW Hydrogen 7 – eine neue Ära der Mobilität. Pressemitteilung, Internet: www.7-forum.com/news/Der-BMW-Hydrogen-7-eine-neue-Aera-der-Mo-1285.html. Zugriff: 10.10.2006.

Fuel Cell Bus Club (2004) Background Information / Fuel Cell Technology / New Generation of Buses Internet: [/www.fuel-cell-bus-club.com/index.php?module=pagesetter&func=viewpub&tid=1&pid=116](http://www.fuel-cell-bus-club.com/index.php?module=pagesetter&func=viewpub&tid=1&pid=116). zugriff: 17.12.2007.

Helmolt von, Rittmar; Eberle, Ulrich (2007): Fuel cell vehicles: Status 2007. In: Journal of Power Sources, 165 (2007), S. 833-845.

Herrmann, M.; Winter, U.: Fuel Cells 2003, 3, No. 3, 141 ff.

HyCar (2006): Der Wasserstoff-Wankelmotor. Informationsseiten über Wasserstofffahrzeuge von Jürgen Kern. Internet: www.hycar.de/wankel.htm. Zugriff: 04.10.06.

Jörissen, Ludwig; Garcke, Jürgen (2000): Brennstoffzellen für den Fahrzeugantrieb. In: Wengel, Jürgen; Schirmeister, Elna (Hg.): Innovationsprozess vom Verbrennungsmotor zur Brennstoffzelle – Chancen und Risiken für die baden-württembergische Industrie. Abschlussbericht. Karlsruhe, Februar 2000, S. 13-48.

Quellen II

Teil 1

Lamm, Arnold (2006): PEM-BZ-Systeme für den mobilen Einsatz. Vortrag, DaimlerChrysler Forschungszentrum Ulm. Internet: www.sfb374.uni-stuttgart.de/rv_02_03/PEM_Brennstoffzelle_Lamm.pdf. Zugriff: 06.11.2006

Teil 2

LBSt (2007): Hydrogen filling stations worldwide. Internet: www.h2stations.org

Los Alamos (1999): Fuel Cells. The green Power.

Teil 3

Manager-Magazin (2005): Hybridautos – Der Airbag-Effekt. Artikel, Internet: www.manager-magazin.de/unternehmen/artikel/0,2828,373740,00.html. Zugriff: 22.10.2006

Mitsubishi (2005): Mitsubishi Motors to drive forward development of next-generation EVs - Colt EV test car uses in-wheel motors & lithium-ion batteries. Pressemitteilung, Internet: <http://media.mitsubishi-motors.com/pressrelease/e/corporate/detail1269.html>. Zugriff: 02.11.2006

Teil 4

Stauch, Thorsten (2005): Präsentation Technik F-Cell. Vortrag, Praxis-Seminar Wasserstoffbetriebene Fahrzeuge, Weiterbildungszentrum Brennstoffzelle. 27.1.2005, Ulm.

Teil 5

Tillmetz, Werner; Benz, Uwe (2006): Methanol Fuel Cell Power Train. Vortrag. European Biofuel Congress, 17.Oktober 2006, Essen

Toyota (2006): Seriell-paralleles Hybridsystem - Fluss der Systemenergie. Schaubild, Internet: www.hybridsynergydrive.com/de/series_parallel.html. Zugriff: 22.10.2006

Umweltbrief (2007): Tesla - ein Elektro-Roadster aus USA. Internet: www.umweltbrief.de/neu/html/aktuell.html#Tesla-Elektro-Roadster. Zugriff: 17.12.2007