

Brennstoffzellen für den Straßenverkehr – Ausweg oder Sackgasse?

von Reinhard Kolke

Überblick

Das Umweltbundesamt unterzog die Brennstoffzellen-Technik im Verkehr einer Kosten-Nutzen-Betrachtung im Vergleich zu anderen Antriebskonzepten. Es zeichnete sich ab, daß Emissionsminderungen und Ressourcenschutz am kostengünstigsten durch verbrauchsoptimierte Fahrzeuge mit Ottomotor mit niedrigsten Abgasemissionen (ultra low emission vehicles) realisiert werden können – selbst wenn kostengünstige Brennstoffzellen-Fahrzeuge verfügbar wären.

The German Federal Environmental Agency (UBA) conducted a cost-benefit analysis and compared fuel cell with other vehicle propulsion technologies. The results indicate that emission reduction and environmental protection can be achieved most cost-effectively by ultra efficient and minimally consuming internal combustion drives (ultra low emission vehicles) – even if low-cost fuel cell vehicles were available.

1. Einleitung

Im Juni 1998 einigten sich der europäische Umweltministerrat und das Europäische Parlament auf einheitliche verschärfte Abgasgrenzwerte für Personenkraftwagen und leichte Nutzfahrzeuge (EURO 3 und EURO 4) sowie auf bessere Kraftstoffqualitäten, die in den Jahren 2000-2005 erreicht werden sollen; dadurch könnten die Schadstoffemissionen des Straßenverkehrs trotz zunehmender Fahrleistungen in den kommenden Jahren erheblich reduziert werden, auch in heute noch belasteten Innenstadtbereichen ([Abbildung 1](#)).

Mit dem Abschluß der Grenzwertverhandlungen für Pkw und Leicht-LKW wird der Schwerpunkt der Bemühungen, die Umweltbelastungen durch den Straßenverkehr zu mindern, darin liegen, die Umweltziele zur Reduzierung

- der Kohlendioxidemissionen,
- des Ressourcenverbrauches und
- der Lärmbelastungen

durch innovative Fahrzeugtechnik zu erzielen [1, 2]. Da die Grenzwerte für die Abgasemissionen der Stufen EURO 3 und EURO 4 bei den Nutzfahrzeugen gegenwärtig offen sind, gelten für diese auch noch die Umweltziele in Bezug auf die Abgasemissionen [3, 4].

Ferner sollten die Grenzwerte für Diesel-Pkw mit einer abschließenden Grenzwertstufe EURO 5 dem Abgasstandard EURO 4 für Benzin-Pkw angepaßt werden [3, 5].

Brennstoffzellen-Antriebe im Straßenverkehr könnten zukünftig also nur dann eine konkurrenzfähige Option zum Erreichen der offenen Umweltziele sein, wenn durch deren Einsatz nicht nur die Luftschadstoffemissionen reduziert, sondern auch nennenswerte und kosteneffiziente Beiträge zur Reduzierung der Kohlendioxidemissionen und des Ressourcenverbrauches geleistet werden.

Bei den Lärmemissionen ist zu erwarten, daß der Brennstoffzellen-Elektroantrieb nur bei geringen Geschwindigkeiten leiser ist als das vergleichbare Benzinfahrzeug, da bei Pkw schon bei Geschwindigkeiten über 40-50 km/h das Rollgeräusch der Reifen dominiert. Die Vorteile leiser Brennstoffzellen- und anderer Elektroantriebe würden damit nur in Einsatzgebieten mit niedrigen Höchstgeschwindigkeiten zum Tragen kommen.

2. Arbeiten des Umweltbundesamtes

Das Umweltbundesamt (UBA) unterzog die Brennstoffzellen-Technik im Verkehr einer Kosten-Nutzen-Betrachtung um zu ermitteln, welche Vor- und Nachteile sie im Vergleich zu anderen Antriebskonzepten im Verkehr nach derzeitigem Wissensstand hat [5, 6, 7]. Ziel der Untersuchung war, mit Brennstoffzellen betriebene Fahrzeuge mit dem fortschrittlichen Stand konventioneller Antriebe zu vergleichen, woraus sich – auf Basis einer Kosten-Nutzen-Betrachtung – Mindestanforderungen für die innovative Brennstoffzellen-Technik im Verkehr ergaben.

Die Stromerzeugung mit Brennstoffzellen hat wegen des hohen Wirkungsgrades und des niedrigen lokalen Schadstoffausstoßes im Vergleich zu anderen Verfahren Vorteile. Aus Umweltsicht ist der Einsatz der Brennstoffzellen allerdings differenziert nach Einsatzbereichen und den hier jeweils geforderten Energiedienstleistungen zu betrachten, wobei der unterschiedliche Stand von Forschung und Entwicklung zu berücksichtigen ist.

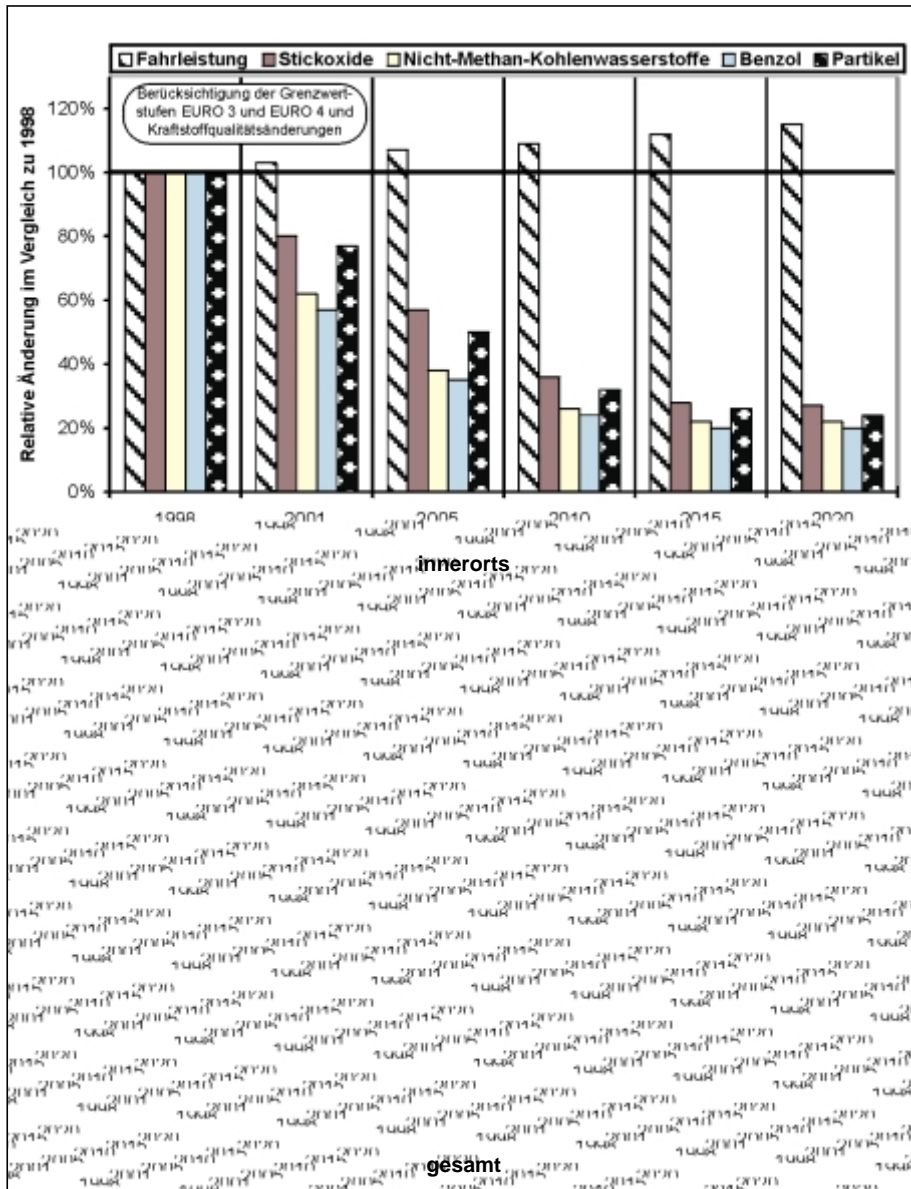
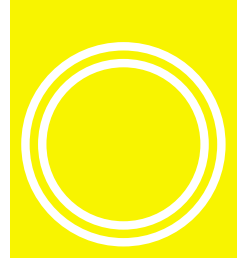


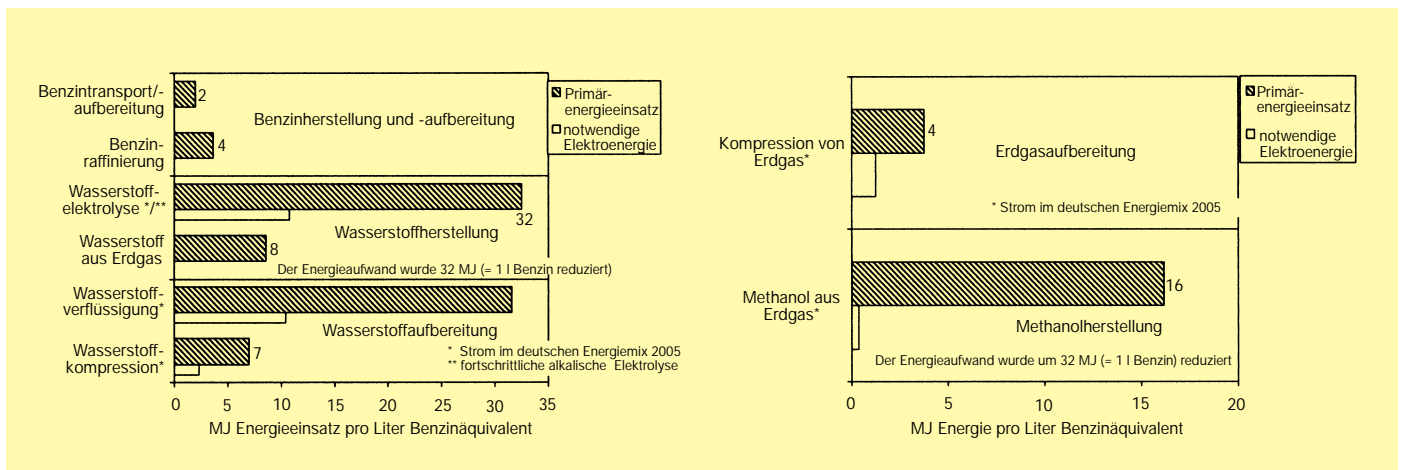
Abbildung 1: Entwicklung der Emissionen des Straßenverkehrs in Deutschland (innerorts, gesamt) im Vergleich zu 1998 [8]

So ist der Einsatz in Bereichen der stationären Energieversorgung, also zum Beispiel in Kraftwerken, schon heute sinnvoll. Brennstoffzellen können in manchen Bereichen fossile Energieträger, wie zum Beispiel Erdgas, wesentlich effizienter in Strom- und Nutzwärme umwandeln als bisherige Kraftwerke oder Wärmerezeuger.

Ein anderes Bild ergibt sich für den Einsatz der Brennstoffzellen-Technik im Kraftfahrzeug. Brennstoffzellen-Fahrzeuge werden mit Wasserstoff oder Methanol angetrieben, also mit Kraftstoffen, die erst mit einem relativ hohen Energieaufwand erzeugt werden müssen (Abbildung 2). Geht man von Einführungsszenarien für Brennstoffzellen-Fahrzeugen aus, so müssen große Mengen Wasserstoff oder Methanol verfügbar sein, die mittelfristig wegen der damit verbundenen Kosten nur zu geringen Mengen durch regenerative Energieträger (z.B. Elektrolyse mit Solarstrom, Wasserstoff aus Biomasse) bereit gestellt werden können.

Der elektrische Energiebedarf zur Erzeugung und Aufbereitung von Wasserstoff aus der Wasserelektrolyse ist mindestens doppelt so hoch wie die Herstellung, Aufbereitung und Vertrieb von Benzin aus fossilem Rohöl, selbst bei Einsatz regenerativ erzeugter elektrischer Energie. Dies ist das Ergebnis, wenn die für die Wasserstoffherstellung notwendige Elektroenergie (z.B. Solarstrom) ins Verhältnis zum Primärenergiebedarf der Benzinherstellung und Aufbereitung gestellt wird. Regenerativ erzeugte elektrische

Abbildung 2: Vergleich des Primärenergieaufwandes für die Herstellung und Aufbereitung von Benzin, Wasserstoff, Erdgas und Methanol (eta = Wirkungsgrad, MJ = Mega Joule = 10⁶ Joule) [6]



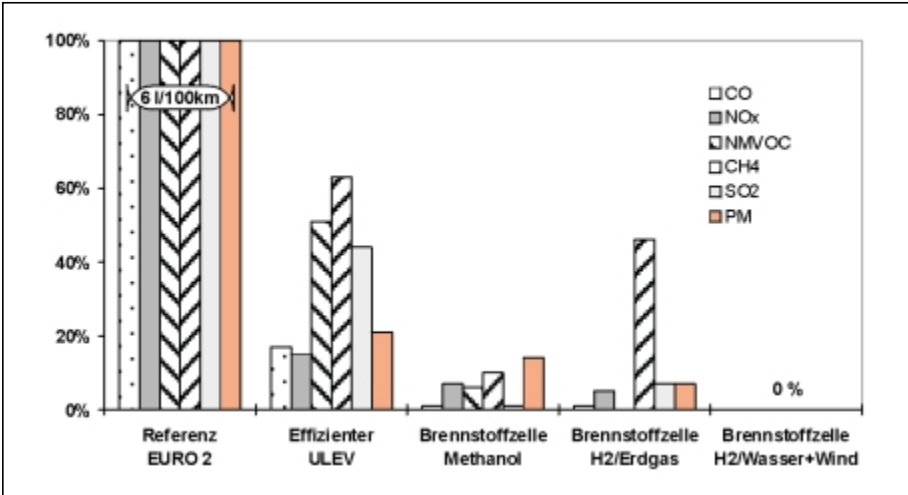


Abbildung 3: Vergleich der Luftschadstoffemissionen unterschiedlicher Antriebsvarianten von Pkw der Kompaktklasse im Vergleich zu einem heutigen EURO 2 Pkw einschließlich Kraftstoffherstellung [6]

Energie könnte ohne die genannten Verluste direkt genutzt werden und damit andere fossile Energieträger bei der Elektrizitätserzeugung ersetzen.

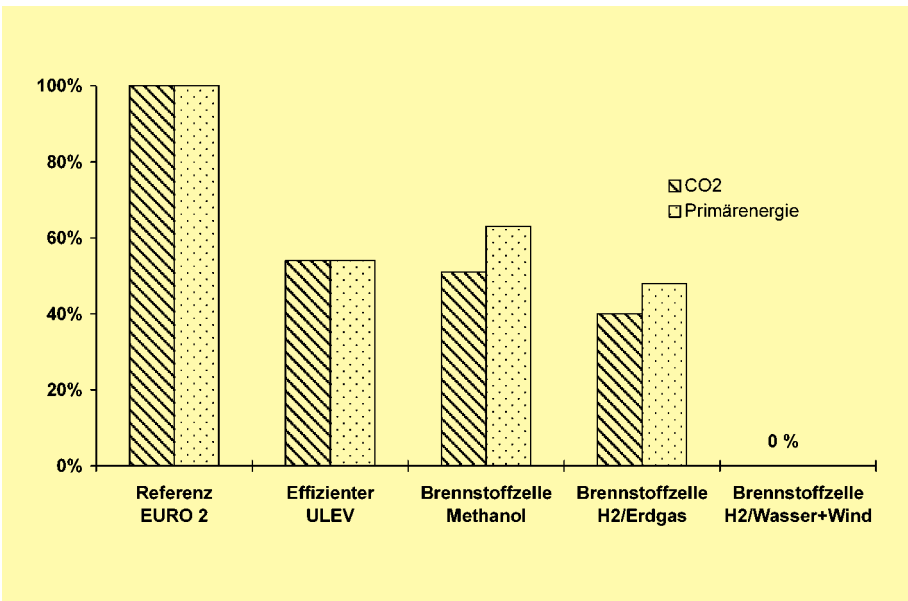
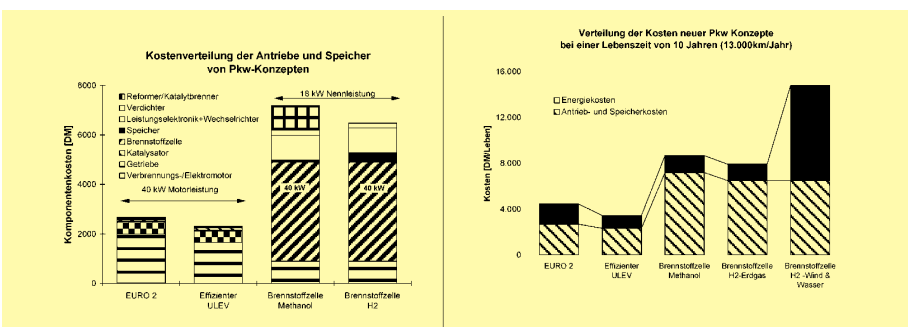


Abbildung 4: Vergleich des Potentials zur Reduktion der CO₂-Emissionen und des Ressourcenverbrauches unterschiedlicher Antriebsvarianten von Pkw der Kompaktklasse im Vergleich zu einem heutigen EURO 2 Pkw einschließlich Kraftstoffherstellung [6]

Abbildung 5: Beispiel der prognostizierte Gesamtkosten der Vergleichsfahrzeuge (weitere Berechnungen unter wechselnden Randbedingungen in [6])



Aus Umweltsicht ist daher – nach heutigem Kenntnisstand – der Einsatz von Wasserstoff aufgrund der hohen Energieverluste bei der Herstellung und Aufbereitung nicht zu befürworten. Selbst die Option, unter Energieverlust Methanol aus Erdgas herzustellen, ist nicht eindeutig besser, da Erdgas ja auch direkt in Fahrzeugen in niedrig emittierenden Verbrennungsmotoren genutzt werden könnte.

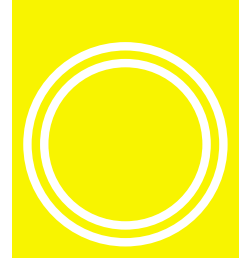
Die Brennstoffzellen-Technologie kann also nur dann in Bezug auf die Energieverluste der Kraftstoffherstellung wettbewerbsfähig sein, wenn diese im Fahrzeug wieder kompensiert werden, d.h. durch einen um 30 bis 35% höheren Wirkungsgrad des Brennstoffzellen-Fahrzeugs im Verhältnis zu einem vergleichbaren Fahrzeug mit Benzin- oder Erdgasverbrennungsmotor.

3. Kosten-Nutzen Analyse von Brennstoffzellen-Fahrzeugen

Um den Umweltutzen der neuen Antriebe zu bewerten, vergleicht man mit einem heutigen Referenzfahrzeug der Kompaktklasse (6 l/100km; EURO 2 Emissionsstandard). Verglichen werden sowohl die Emissionsminderungen der limitierten Schadstoffe (Abbildung 3), als auch das Potential zur Reduktion der CO₂-Emissionen und des fossilen Primärenergieverbrauches (Abbildung 4).

Folgende Antriebskonzepte werden verglichen:

- Effizientes Fahrzeug mit Verbrennungsmotor und mit niedrigsten Emissionen (effizientes Ultra-Low-Emission-Vehicle (ULEV); 3,25 l/100km)
- Brennstoffzellen-Fahrzeug mit Methanolreformer (Super-Ultra-Low-Emission-Vehicle (SULEV); 2,91 l/100km Benzinäquivalent), Methanol aus Erdgas
- Brennstoffzellen-Fahrzeug mit Wasserstoff (Zero-Emission-Vehicle (ZEV); 2,24 l/100km Benzinäquivalent), Wasserstoff aus Erdgas (H₂/Erdgas)
- Brennstoffzellen-Fahrzeug mit Wasserstoff (ZEV; 2,24 l/100km Benzinäquivalent), Wasserstoff aus Elektrolyse mit vergleichsweise kostengünstigem Wind- und Wasserkraft-Strom (H₂/Wasser+Wind)



Das Brennstoffzellen-Fahrzeug mit Wasserstoff aus regenerativ erzeugtem Strom weist im Vergleich zu allen anderen Fahrzeugtypen die beste Emissionsbilanz auf. Diese Variante realisiert weitgehend ein Nullemissions-Fahrzeug, sofern dem Brennstoffzellen-Antrieb nur der regenerativ erzeugte Strom zugerechnet wird und die Umweltwirkungen der Herstellung der Anlagen vernachlässigt werden. Beim Brennstoffzellen-Fahrzeug mit Methanol treten geringfügige direkte und indirekte Emissionen auf. Hingegen ergeben sich beim Brennstoffzellen-Fahrzeug mit Wasserstoff aus Erdgas nur indirekte Emissionen. Obwohl die Emissionsminderungen der Brennstoffzellen-Fahrzeuge bei den Luftschadstoffen (CO, NOx, NMVOC, CH₄, SO₂, PM) zunächst eindrucksvoll erscheinen (Abbildung 3), weist das ULEV-Fahrzeug, dessen Emissionsniveau dem zukünftigen EURO 4 Standard für Otto-Pkw entspricht, gegenüber dem Referenz-Pkw bei allen Schadstoffen bereits nennenswerte Emissionsminderungen von 30 bis über 80% auf [6].

Die durch den ULEV bzw. EURO 4 Standard für Benzin-Pkw erreichbare Reduktion der direkten Emissionen ist ausreichend, um die notwendigen Luftqualitätsziele zu erreichen. Eine weitergehende Reduktion der direkten Abgasemissionen bei Pkw wird über die dargestellten Minderungen der Benzinfahrzeuge in absehbarer Zeit nicht notwendig sein.

Betrachtet man die Minderungsmöglichkeiten der CO₂-Emissionen und der fossilen Ressourcen, so ergibt sich folgendes Bild (Abbildung 4):

Brennstoffzellen-Fahrzeuge, deren Kraftstoffe aus fossilen Energieträgern bereitgestellt werden, besitzen ein mit einer energieeffizienten Super-Katalysator-Technologie (3-Liter-Auto mit niedrigsten Emissionen) vergleichbares Minderungspotential für Kohlendioxid, wenn Methanol aus Erdgas hergestellt und genutzt wird. Die Verwendung von Wasserstoff kann die CO₂-Emissionen und den Primärenergieverbrauch noch weiter bzw. sogar vollständig reduzieren, wenn Solarwasserstoff verwendet wird (siehe Abbildung 4).

Betrachtet man die Kosten dieser An-

triebe, so werden diese im wesentlichen durch die Annahmen und Voraussetzungen zu den Herstellungskosten des Brennstoffzellen-Antriebes bestimmt. Hier wurden verschiedene Kostenschätzungen u.a. mit U.S.-kalifornischen Zieldaten berücksichtigt [6]. Wenn im Straßenverkehr Kraftstoffe zum Einsatz kommen, die auf regenerativen Energieträgern basieren (z.B. Solarwasserstoff), werden die Gesamtkosten jedoch erheblich von den Kraftstoffkosten beeinflusst (Abbildung 5). Der komprimierte Solarwasserstoff wurde mit Kosten von 2,86 DM/l Benzinäquivalent zugrunde gelegt.

Das Kosten-Nutzen-Verhältnis der neuen Technologien wird ermittelt, indem man die im Vergleich zum Referenz-Pkw höheren bzw. geringeren Kosten ins Verhältnis zu den erreichbaren Emissionsminderungen setzt. Der bilanzierte Zeitraum berücksichtigt eine Lebensdauer von 10 Jahren.

4. Schlußfolgerung

Nach den bisherigen Berechnungen am Beispiel einer Kosten-Nutzen-Analyse zeichnet sich ab, daß Emissionsminderungen und Ressourcenschutz wesentlich kostengünstiger durch ver-

brauchsoptimierte Fahrzeuge mit Ottomotor mit niedrigsten Abgasemissionen (ULEV) realisiert werden können als durch Fahrzeuge mit Brennstoffzellen-Antrieb – selbst wenn kostengünstige Brennstoffzellen-Fahrzeuge verfügbar wären (Tabelle).

Bezogen auf die gesamte Lebensdauer werden zum Beispiel die Mehrkosten für eine verbrauchsarme Super-Katalysator-Technologie in Verbindung mit verbesserten Kraftstoffen durch die Einsparung bei den Kraftstoffkosten mehr als ausgeglichen. Das verbrauchsarme Super-Katalysator-Fahrzeug kann also gleichzeitig CO₂ reduzieren und verursacht durch den niedrigen Kraftstoffverbrauch noch geringere Gesamtkosten als ein heutiges Fahrzeug. Demgegenüber ist die Brennstoffzellen-Technologie mit vergleichsweise hohen Kosten verbunden.

Einer vehementen Befürwortung der Entwicklung der Brennstoffzelle für die mobile Anwendung im Verkehrsbereich durch die Industrie steht die detaillierte und sogar auf den optimistischen Annahmen von Herstellern basierende Analyse des Umweltbundesamt [6] gegenüber, die diese Entwicklung aus Umweltsicht als nicht kosteneffizient und nicht notwendig

Tabelle: Kosten für die Vermeidung von Schadstoffen, Klimagas- und Primärenergieverbrauch für verbrauchsreduzierte ULEV-Pkw und vergleichbare, zukünftige Brennstoffzellen-Pkw im Vergleich zu heutigen Pkw am Berechnungsbeispiel [6] (die Daten basieren auf Angaben und Prognosen von Brennstoffzellen-Herstellern)

Basis 1996 EURO II Schadstoff	Vermeidungskosten von Pkw für Emissions- und Primärenergieverbrauchsreduktion im Vergleich zu einem 1996 EURO 2 Pkw			
	Effizientes ULEV DM/kg	Brennstoffzelle Methanol DM/kg	Brennstoffzelle H ₂ aus Erdgas DM/kg	Brennstoffzelle H ₂ (reg. Strom) DM/kg
CO	- 3,5	12,5	10,3	30,5
NO _x	- 15,8	61,1	49,2	139,8
NMVOC	- 36,7	80,7	62,2	185,3
CH ₄	-233,6	401,5	544,5	885,3
SO ₂	- 85,6	203,8	180,3	498,0
PM	-700,8	2.710,1	2.052,2	5.691,3
CO ₂	- 0,1	0,4	0,3	0,5
Primärenergie	- 7,5 DM/GJ	39,7 DM/GJ	22,6 DM/GJ	35,3 DM/GJ
CO	- Kohlenstoffmonoxid		CH ₄	- Methan
NO _x	- Stickstoffoxid		PM	- Partikel
CO ₂	- Kohlendioxid		SO ₂	- Schwefeldioxid
NMVOC	- flüchtige Organische Verbindungen ohne Methan			

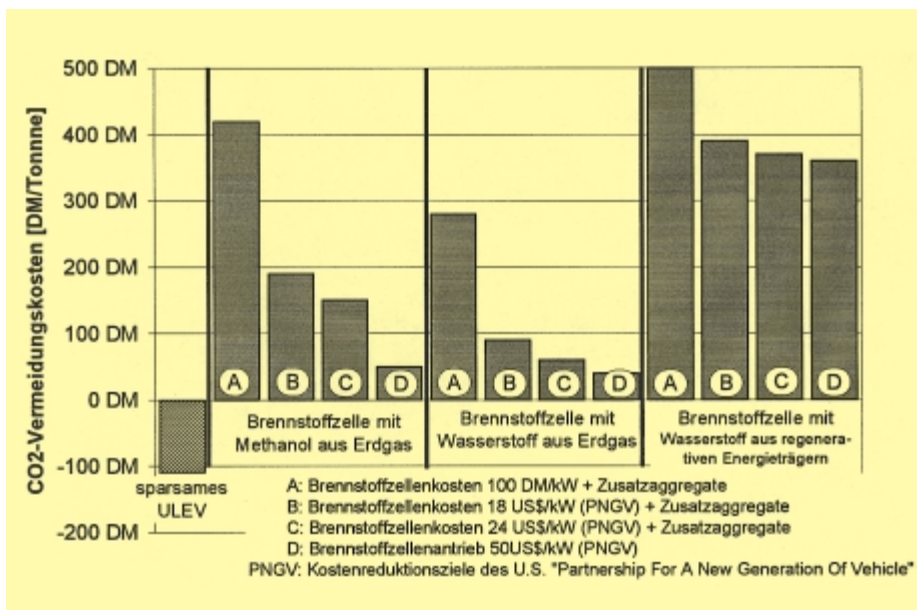


Abbildung 6: Analyse der CO₂-Vermeidungskosten für verschiedene Antriebsysteme für PKW der Kompaktklasse unter Berücksichtigung der Antriebs- und Energiekosten unter wechselnden Randbedingungen

darstellt. Dies gilt auch unter Berücksichtigung der optimistischen U.S.-kalifornischen Zieldaten (siehe [Abbildung 6](#)).

Es ist deshalb zu prüfen, in welcher Weise und in welcher Höhe Mittel seitens der öffentlichen Hand dafür aufgewendet werden sollen, um diese gegensätzlichen Positionen vor einer Entscheidung über eine anwendungsorientierte Förderung mit öffentlichen Mitteln in größerem Umfang weiter zu klären, bzw. unter welchen Gesichtspunkten (wirtschaftlicher und/oder umweltpolitischer Art) über eine Förderung zu entscheiden ist.

Unabhängig davon sind Grundlagenuntersuchungen zur Optimierung der Brennstoffzellen-Technik als solcher wichtig, die insbesondere auch der als aussichtsreich angesehenen zukünftigen Anwendungen im stationären Be-

reich dienen, zu befürworten. Da das Brennstoffzellen-Auto nach Herstellerangaben nicht vor 2005-2010 marktreif verfügbar sein wird, aber bereits jetzt die CO₂-Emissionen aus dem Verkehr zum Schutz des Klimas erheblich verringert werden müssen, sind auf absehbare Zeit nur von der Weiterentwicklung der heutigen, konventionellen Fahrzeugtechniken Emissionsminderungen zu erwarten. Bis weit in das nächste Jahrtausend wird es für PKW keinen echten Ersatz für weiterentwickelte konventionelle Kraftstoffe und emissionsarme, effiziente konventionelle Kraftstoffe und emissionsarme, effiziente konventionelle Antriebe geben. Im Bereich der Nutzfahrzeuge und Linienbusse etwa, die schon jetzt in den Innenstädten mit Erdgasmotoren sehr schadstoffarm fahren, ließe sich auch CO₂-Ausstoß durch optimierte Magermotoren noch weiter reduzieren.

Literatur

- [1] „Nachhaltiges Deutschland, Wege zu einer dauerhaft umweltgerechten Entwicklung“, Umweltbundesamt Berlin, Erich Schmidt Verlag (1997)
- [2] N. Gorißen, R. Kolke, H. Verron, A. Pastowski
„OECD Project on Environmentally Sustainable Transport (EST), Report on the German Case Study for Phase 2“, Umweltbundesamt Berlin / Wuppertal Institut (1997)
- [3] S. Rodt, A. Friedrich, D. Jost, R. Kolke, W. Niederle, W. Rudolf, M. Tappe
„Passenger Cars 2000 – Requirements, Technical Feasibility and Costs of Exhaust Emission Standards for the Year 2000 in the European Community“, UBA TEXTE 61/95, Umweltbundesamt Berlin (1995)
- [4] S. Rodt, A. Friedrich, D. Jost, L. Mönch, W. Niederle, R. Kolke, M. Tappe
„HDV 2000 – Requirements, Technical Feasibility and Costs of Exhaust Emission Standards for Heavy Duty Vehicle Engines for the Year 2000 in the European Community“, Umweltbundesamt Berlin (1996)
- [5] R. Kolke, A. Friedrich
„Gegenüberstellung von Pkw mit Verbrennungskraftmaschinen, Hybridantrieben und Brennstoffzellen aus Umweltsicht“, VDI-Tagung Innovative Fahrzeugantriebe in Dresden, VDI Verlag Düsseldorf (1998)
- [6] R. Kolke
„Technische Optionen zur Verminderung der Verkehrsbelastungen – Brennstoffzellen-Fahrzeuge, 1. Berichtsstand, Bewertungsgrundlagen“, Umweltbundesamt Berlin (1998)
- [7] R. Kolke, A. Friedrich
„The Assessment of Fuel Cells in Transport from the Environmental Point of View“, Proc. 13th EU Automotive Symp., Sevilla (1998)
- [8] W. Knörr, M. Tappe
„Berechnungen der Emissionen des Straßenverkehrs in Deutschland in den Jahren 1995 bis 2020 unter Berücksichtigung der Fahrleistungsprognosen des ifo Instituts 1995, EURO 3 und EURO 4 Grenzwerte und geänderter Kraftstoff-Qualitäten“, Umweltbundesamt Berlin und ifeu Institut Heidelberg (1998)