

Wasserstoffbusse als Wegbereiter für die zukünftige Verkehrswirtschaft

250.000 Kilometer im Wasserstoffbetrieb

Hydrogen buses as future-oriented vehicles for tomorrow's road transport

What was regarded as a vision only a few years ago has become reality: hydrogen-powered vehicles in daily operation. Best example are three hydrogen buses which have been transporting passengers in daily apron operation at Munich airport since 1999. The Munich airport project demonstrates elements of an autarchically built-up hydrogen industry and, because of its real-life operating conditions, is amongst the most successful hydrogen projects worldwide. Positive results have also been achieved for the fuel cell as a vehicle drive system. The first MAN fuel cell bus has been successfully tested for six months in local public transport and has gained positive acceptance of both drivers and passengers. As all hydrogen vehicles have clocked up in total more than 250,000 km, MAN has been able to gather far-reaching experiences with hydrogen as a fuel and the future's propulsion systems. Hydrogen as the cleanest future-oriented fuel has the potential of reducing in the long term the dependence on fossil fuels and of lowering the greenhouse gas emissions from vehicles. In urban operation the fuel cell drive system has specific advantages, which makes it ideal for city vehicles. Further-developed internal combustion engines equipped with direct hydrogen injection and having the efficiency potential of the diesel drive will compete with the fuel cell. The successful market launch of hydrogen systems will depend not only on further development in technology. Europe-wide consensus in the fuel question and the creation of favourable framework conditions are the preconditions for preparing the long-term changeover from fossil to renewable energy sources in future transport.



Dipl.-Ing.
Christian Gruber

Anschrift der Autoren:
MAN Nutzfahrzeuge AG,
Abteilung TV,
Postfach 50 06 20,
D-80967 München,
Tel. +49 (0)89/15803960,
Fax +49 (0)89/15803228



Foto: E. Hipp, C. Gruber

Abbildung 2: Wasserstoff-Gelenkbusse auf dem Vorfeld am Flughafen München
Figure 2: Hydrogen powered articulated buses at the Munich Airport apron area

Was noch vor wenigen Jahren als Vision galt, ist heute sichtbare Realität geworden: Wasserstofffahrzeuge im täglichen Einsatz. Bestes Beispiel sind drei Busse mit Wasserstoff-Antrieb, die seit 1999 in München tagtäglich auf dem Vorfeld des Flughafens Passagiere transportieren. Das Projekt am Flughafen München demonstriert Elemente einer autark aufgebauten Wasserstoff-Wirtschaft und zählt aufgrund seines operativen Betriebes zu den weltweit erfolgreichsten Wasserstoff-Projekten. Eine positive Bilanz kann auch für die Brennstoffzelle als Fahrzeugantrieb gezogen werden. Der erste MAN-Brennstoffzellenbus wurde erfolgreich ein halbes Jahr im ÖPNV-Einsatz getestet und überaus positiv von Fahrern und Fahrgästen aufgenommen. Inzwischen hat MAN mit mehr als 250.000 km Wasserstoffbetrieb weitreichende Erfahrungen sammeln können und setzt die Entwicklungsarbeiten an Verbrennungsmotoren und Brennstoffzellen fort.

Neue Zielrichtung bei den Emissionen

In der Vergangenheit war die Reduzierung von Partikeln (PM), Stickoxiden (NOX), Kohlenwasserstoffen (HC) und Kohlenmonoxiden (CO) im Abgas ein Schwerpunkt in der Entwicklung von Nutzfahrzeugantrieben und eine wesentliche Motivation für die Erprobung und Einführung alternativer Kraftstoffe und Antriebe. Seit 1990 gelten in Europa Grenzwerte für die Emissionen von Nutzfahrzeugantrieben, die in Messzyklen überprüft werden. Für den im Nutzfahrzeug dominanten Dieselantrieb liegt der Schwerpunkt bei der Absenkung von Partikeln und Stickoxiden.

Bis heute konnten bereits deutliche Absenkungen erreicht werden. Ab 2008 tritt die letzte Stufe Euro 5 in Kraft, die den Stickoxidanteil um weitere 40 % im Vergleich zu Euro 4 reduziert. Aufwändige Messtechniken werden nötig sein, um die wenigen Restbestandteile im Abgas überhaupt noch erfassen zu können. Unter Berücksichtigung der Marktdurchdringung neuer Antriebe ist ein deutlicher Rückgang der Gesamtemissionen in Deutschland und in ganz Europa zu erwarten. Langfristige Anforderungen an die lokale Luftqualität können dann von konventionellen Antrieben dauerhaft eingehalten werden.

Damit wird sich der Handlungsschwerpunkt bei den Emissionen zunehmend auf die Reduzierung von Klimagasen verlagern. Die Verbrennung fossiler Kraftstoffe ist stets mit der Freisetzung von CO₂ verbunden. Der Eintrag von CO₂ in die Atmosphäre trägt zur Erderwärmung bei und ist langfristig aus Klimaschutzgründen zu reduzieren. Zur Einhaltung der im Kyoto-Protokoll vereinbarten Vorgaben wird auch der Verkehrsbereich einen Beitrag leisten müssen.

Langfristige Sicherstellung der Energieversorgung im Verkehr

Der Straßenverkehr wird gegenwärtig nahezu ausschließlich über den Primärenergieträger Erdöl versorgt. In Ländern mit eigenen Erdgasvorkommen beziehungsweise in Märkten, die kurzfristig auf die sauberste, heute serienmäßig verfügbare Antriebstechnologie zurückgreifen möchten, kommt in Nischenanwendungen Erdgas zum Einsatz. Erdöl wie auch Erdgas sind fossile und be-

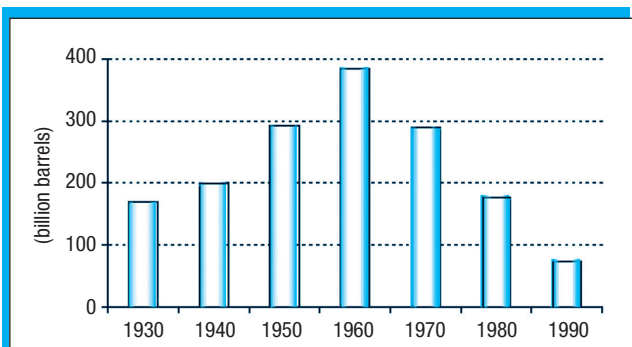


Abbildung 1: Rückgang bei der Entdeckung neuer Ölfelder
Figure 1: Decrease in finding of new oil fields

grenzt verfügbare Primärenergieträger. Trotz weiterer Verbesserungen im Kraftstoffverbrauch wird infolge steigender Mobilität weltweit der Bedarf an Energie zunehmen.

Mit der Erschließung der Erdölfelder in der Nordsee hat Europa mittelfristig ein Gegengewicht zu den großen Vorkommen in den Opec-Ländern geschaffen. Mittelfristig steigen die Ölimporte aus den Opec-Ländern. Darüber hinaus müssen weitere, bisher noch unbekannt, nicht-konventionelle Ölvorkommen zur Deckung des zukünftigen Ölverbrauchs beitragen. Eine Neuorientierung in der Energieversorgung ist absehbar, da seit den 60er Jahren die Zahl neu entdeckter, großer Ölfelder kontinuierlich zurückgeht (Abbildung 1). Im Sinne einer verantwortungsvollen Zukunftsvorsorge ist der Umstieg auf erneuerbare Energien in langfristiger Perspektive der notwendige Schritt zur Erreichung der Klimaschutzziele sowie zur Minderung der einseitigen Abhängigkeit des Verkehrs von fossilen Energien.

Zukunftskraftstoff Wasserstoff

Wasserstoff wird weltweit als der Kraftstoff mit dem höchsten Potenzial betrachtet, die genannten Langfristziele zu erreichen. Wasserstoff kann aus fossilen sowie nicht-fossilen Energieträgern gewonnen werden. Für die Herstellung stehen zahlreiche Verfahren zur Verfügung. Wasserstoff wird heute überwiegend aus den fossilen Energieressourcen Erdgas und Schweröl für die chemische Industrie erzeugt. Die Reduzierung von CO₂ in der Gesamtkette ist unmittelbar an die Effizienz der Herstellungsverfahren und Fahrzeugantriebe gekoppelt und gestattet in begrenztem Umfang Reduzierungen, falls fossile Energieträger verwendet werden. Erhebliches Reduktionspotenzial bieten Produktionsverfahren über Biomasse oder Wasserelektrolyse mit regenerativ erzeugtem Strom. Die Erzeugung über Strom ist darstellbar sowohl in Großanlagen als auch dezentral in kleinen Elektrolyseuren, was während der Einführungsphase eines neuen Kraftstoffes von Vorteil ist. Aus MAN-Sicht eignen sich sowohl Verbrennungsmotoren als auch Brennstoffzellen für den Wasserstoffbetrieb von Nutzfahrzeugen.

Seit Anfang der 90er Jahre entwickelt MAN Wasserstoffantriebe vorrangig für Stadtbusse. Busse im Flotteneinsatz können zentral betankt werden

und ermöglichen einen betrieblichen Einsatz trotz fehlender Infrastruktur für Wasserstoff. Darüber hinaus bieten Niederflerbusse den notwendigen Bauraum zur Unterbringung von neuartigen Antriebssystemen mit erhöhtem Volumenbedarf.

Erste Wasserstoffbusse mit H₂-Verbrennungsmotoren

Der weltweit erste Wasserstoffbus mit Flüssigwasserstoff-Speicherung wurde ab 1996 zwei Jahre lang im regulären ÖPNV-Betrieb in München und Erlangen eingesetzt. Das Fahrzeug wurde im Rahmen des Euro-Quebec-Hydro-Dehydrogen-Pilot-Projektes entwickelt und legte insgesamt 42.000 km im Liniendienst zurück. Seit Mitte 1999 fahren drei MAN-Niederflur Gelenkbusse mit Wasserstoff-Antrieb auf dem Flughafen München (Abbildung 2).

Die Niederflur-Gelenkbusse wurden für den Betrieb am Flughafen München entwickelt und sind vollständig in den operativen Vorfeldbetrieb integriert. Im Projekt wurden wesentliche Bausteine einer zukünftigen Wasserstoffwirtschaft, beginnend bei der Erzeugung per Stromelektrolyse bis zur Fahrzeuganwendung realisiert (Abbildung 3) und sind seit drei Jahren unter Alltagsbedingungen in Betrieb.

Im Rahmen der Projektphase 2, die von Mitte 2001 bis Ende 2004 läuft, beteiligt sich MAN mit der Entwicklung eines aufgeladenen Wasserstoff-Motors sowie dem Einsatz von zwei Brennstoffzellenbussen. Ziel der Ent-

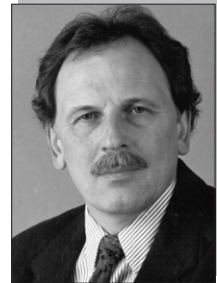
wicklungsarbeiten am Verbrennungsmotor ist die Anhebung der Wirkungsgrade. In Grundsatzversuchen konnten bereits Werte über 40 % erreicht werden, wenn Wasserstoff vergleichbar zum Dieselprozess direkt in den Verbrennungsraum eingeblasen wird.

Mit einer Fahrleistung von insgesamt mehr als 250.000 km seit 1996 hat MAN eindrucksvoll die Alltagstauglichkeit der Antriebstechnik und die sichere Handhabung von Wasserstoff als Kraftstoff bei Kunden unter Beweis gestellt.

Brennstoffzellen für den Busantrieb

Der erste Brennstoffzellenbus von MAN wurde im Rahmen der Wasserstoffinitiative Bayern des Bayerischen Staatsministeriums für Wirtschaft, Verkehr und Technologie entwickelt und im Mai 2000 der Weltöffentlichkeit präsentiert. Als wesentlicher Vorteil von Brennstoffzellen-Antriebssystemen gelten die hohen Wirkungsgrade im Teillastbereich. Nach Abzug der Nebenverbraucher zur Versorgung der Zellen sind noch Systemgesamtwirkungsgrade von über 50 % erzielbar (Abbildung 6). Sowohl der geräuscharme Betrieb als auch der niedrige Teillastverbrauch macht Brennstoffzellen attraktiv für den Einsatz in Stadtfahrzeugen.

Die PEM-Brennstoffzellenanlage besteht aus vier elektrisch in Reihe geschalteten Modulen mit insgesamt 640 Einzelzellen und der Versor-



Dipl.-Ing. Eberhard Hipp

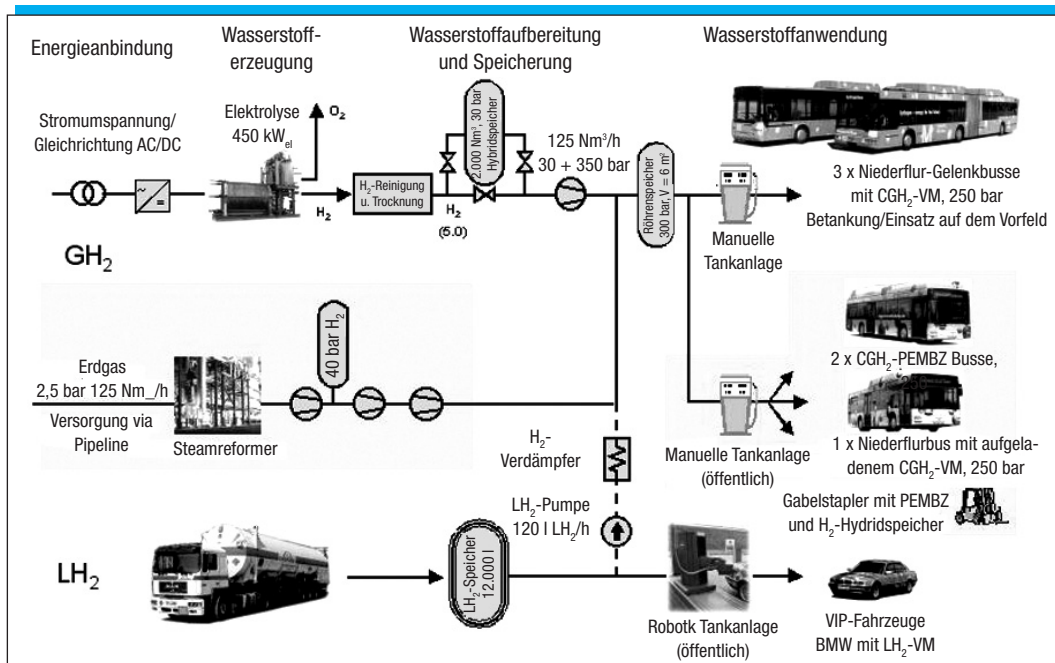


Abbildung 3: Wasserstoffprojekt Flughafen München (Phase 2: blau hinterlegt).

Figure 3: Hydrogen Project Airport Munich (Phase 2: blue background)

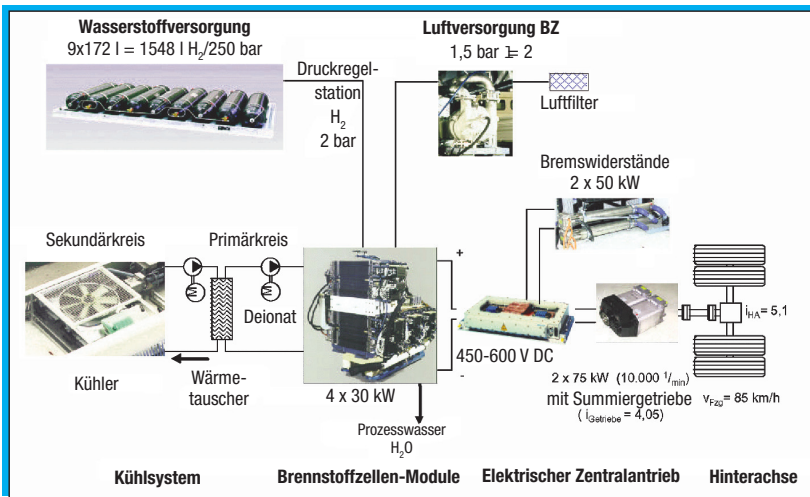


Abbildung 4: Antriebssystem des ersten MAN – Brennstoffzellenbusses
 Figure 4: Propulsion system of the first MAN FC bus

gungsperipherie und erzeugt Gleichstrom mit circa 450-600 V Spannung. Die Brennstoffzellenanlage liefert Gleichstrom, der in der Leistungselektronik zu Wechselstrom gewandelt wird. Zwei Siemens-Asynchronmotoren, die über ein Summiergetriebe mechanisch miteinander verbunden sind, treiben direkt die serienmäßige Hinterachse an. Das Konzept des elektrischen Zentralantriebs nutzt bewährte und kostengünstige Komponenten von MAN-Omnibussen. Der Antrieb gewährleistet die für Stadtbusse erforderlichen Fahrleistungen und sichert einen komfortablen und geräuscharmen Fahrkomfort (Abbildung 4). Zur Speicherung des gasförmigen Wasserstoffes mit einem Fülldruck von 250 bar wurden 9 Leichtbaubehälter auf dem Busdach montiert. Weitere Komponenten zur Kühlung der Brennstoffzellenanlage sowie die Umrichter der Leistungselektronik sind ebenfalls auf dem Fahrzeugdach untergebracht. Eine Vielzahl von Erkenntnissen aus früheren Projekten, in denen Erfah-

rungen mit elektrischen Antrieben sowie mit der Speicherung von alternativen Kraftstoffen gesammelt werden konnten, erleichterte die Entwicklung und Zulassung des Brennstoffzellenbusses für den ÖPNV-Einsatz (Abbildung 5).

Die 6-monatige Erprobung des neuen Antriebssystems unter praxisnahen Bedingungen erfolgte bei den Verkehrsbetrieben in Nürnberg, Erlangen und Fürth im Zeitraum 10/2000 bis 4/2001. Die Resonanz bei den Fahrgästen war außerordentlich positiv, wie durch eine Fahrgastbefragung ermittelt wurde. Der Bus legte insgesamt rund 8.000 km im Liniendienst zurück.

Weitere Wasserstoffbusse in Vorbereitung

Ein zweiter Niederflrbus mit Brennstoffzellenantrieb ist derzeit in Vorbereitung. Dieses Fahrzeug wird ebenfalls mit einer PEM-Brennstoffzellenanlage ausgestattet und erhält zusätzlich noch einen elektrischen Energiespeicher zur Nutzung der Bremsenergie. Als Kraftstoff kommt Flüssigwasserstoff zum Einsatz. Im Vergleich zum 250-bar-Druckspeichersystem benötigt das Bus bei gleichem Energieinhalt weniger als die Hälfte des Einbauvolumens und des Speichergewichts. Die Entscheidung für Druck- oder Flüssigwasserstoff hängt von den technischen Gegebenheiten des Fahrzeuges, wie zum Beispiel dem Einbauvolumen, sowie von der Infra-

struktur und den Kundenanforderungen bezüglich der Reichweite ab. Zwei weitere Brennstoffzellenbusse sind im Rahmen des Wasserstoff-Projektes am Flughafen München geplant und sollen ab Ende 2003 eingesetzt werden.

Ausblick

Technologisch haben Brennstoffzellenantriebe inzwischen einen hohen Entwicklungsstand erreicht und werden in den nächsten Jahren hinsichtlich Systemgewicht und Einbauvolumen gegenüber konventionellen Antrieben keine wesentlichen Nachteile mehr haben. Die Akzeptanz beim Kunden hängt neben der Frage der Infrastruktur davon ab, wann die Kosten dieser Antriebe die am Markt vorherrschenden Größenordnungen erreichen. Als Messlatte sind zumindest die Kosten von Erdgasantrieben, die heute in der Größenordnung von 200-275 €/kW inklusive Kraftstoffspeicher liegen, zu erreichen.

In Konkurrenz zur Brennstoffzelle werden die Entwicklungsarbeiten am Wasserstoff-Motor fortgesetzt. Aufgeladene Verbrennungsmotoren mit Wasserstoff-Direkteinblasung können die Effizienz heutiger Dieselantriebe erreichen und werden sich in Überland- und langfristig auch Fernverkehrsfahrzeugen behaupten können. Bestimmend für die erfolgreiche Markteinführung von Wasserstoff wird nicht nur die Weiterentwicklung der Technologien sein. Der europaweite Konsens in der Kraftstofffrage sowie die Schaffung günstiger Rahmenbedingungen sind unverzichtbare Voraussetzungen für den langfristigen Umstieg von fossiler auf erneuerbare Energie im Verkehr.

Dipl.-Ing. Eberhard Hipp,
 Dipl.-Ing. Christian Gruber

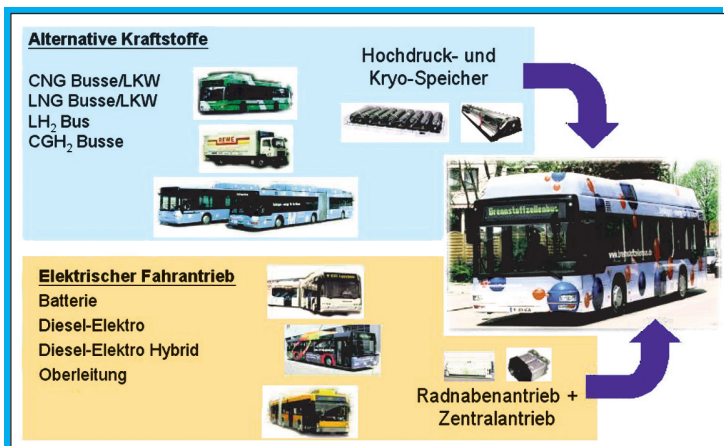


Abbildung 5: Brückentechnologien für Brennstoffzellenfahrzeuge
 Figure 5: Bridging technologies for FC vehicles

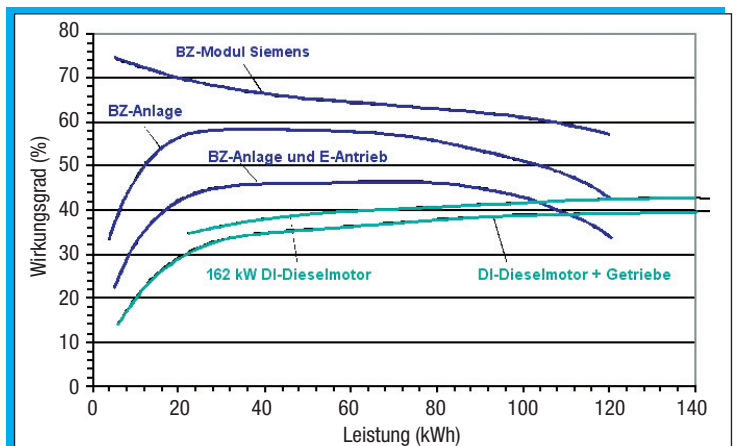


Abbildung 6: Wirkungsgradvergleich Siemens-Brennstoffzelle mit Dieselmotor im Stadtbus
 Figure 6: Efficiency comparison Siemens FC versus Diesel engine in city buses