

**HaWA Hamburger
Wasserstoff-Agentur GmbH**

**Die Hamburger
Wasserstoff-Fahrzeugflotte
im Projekt W.E.I.T.**

Verfasser:
Stefan Zisler

Hamburg, Juli 2002

Inhaltsverzeichnis

1	ZUSAMMENFASSUNG	2
1.1	Projektpartner und Management	2
1.2	Erfahrungen in Phase 1	3
1.2.1	Fazit und Ausblick	3
2	HINTERGRUND UND PROJEKTZIELE	4
2.1	Projektpartner und Management	5
3	FAHRZEUGE	8
3.1	Umrüstung der Fahrzeuge	9
3.1.1	Systemkomponenten	9
3.1.2	Sicherheitsmaßnahmen	11
3.1.3	Wartung	12
3.1.4	Fahrzeugzulassung	12
3.1.5	Fahrzeugbetrieb	12
4	TANKSTELLE	14
4.1	Komponenten der Tankstelle	14
4.1.1	Der Betankungsvorgang	15
4.1.2	Verdichter und Zwischenspeicher	15
4.1.3	Die Zapfsäule	16
4.2	Genehmigungsverfahren	18
4.2.1	Bauantrag	19
4.2.2	AfA Antrag	19
4.3	Kraftstoffversorgung	20
5	ERFAHRUNGEN	21
5.1	Fahrzeuge	21
5.2	Tankstelle	23
6	FAZIT UND AUSBLICK	24

Die Hamburger Wasserstoff-Flotte im Projekt W.E.I.T.

1 Zusammenfassung

1997 hat die Wasserstoff-Gesellschaft Hamburg e.V. das Projekt W.E.I.T. (Wasserstoff.Energie.Integration.Transport.) initiiert, um die Einführung von Wasserstoff als Kraftstoff zu forcieren. Wesentliche Kernpunkte von W.E.I.T. waren:

- Umrüstung und Betrieb von Lieferfahrzeugen auf Wasserstoffbetrieb
- Betankungseinrichtung für Wasserstoff
- Einsatz der Fahrzeuge im realen Alltagsbetrieb
- Nutzung von regenerativer Energie zur Erzeugung von Wasserstoff
- Genehmigung von Tankstelle und Fahrzeugen
- Maßnahmen zur Akzeptanz

Das Projekt W.E.I.T. wurde in zwei Phasen unterteilt. In der ersten Phase wurden sechs Lieferfahrzeuge mit Verbrennungsmotor auf den Betrieb mit Wasserstoff umgerüstet und zur Betankung der Fahrzeuge eine Wasserstofftankstelle errichtet. In der zweiten Phase werden dann effizientere und schadstofffreie Brennstoffzellenfahrzeuge eingesetzt und der Wasserstoff wird mit einem Elektrolyseur an der Tankstelle mit Strom aus erneuerbaren Energien produziert. Hierdurch ist der Betrieb der Fahrzeuge dann von der Energiequelle bis zum Antrieb emissionsfrei.

1.1 Projektpartner und Management

Zur Abwicklung und Koordinierung des Projekts wurde die Projekt-Management Gesellschaft Hamburger Wasserstoff-Agentur GmbH (HaWA) gegründet. Finanziert wird die Gesellschaft durch Beiträge der drei Projektteilnehmer, die je ein Fahrzeug betreiben:

- HASPA Hamburger Sparkasse
- Hermes Versand Service
- HEW, Hamburgische Electricitäts-Werke AG
- HGW Hein Gas Hamburger Gaswerke GmbH
- HHA, Hamburger Hochbahn AG
- HOYER GmbH

Der Projektverbund durch eine ‚Know-how Gruppe‘ von Unternehmen unterstützt, die ihr jeweiliges Spezialwissen unentgeltlich zur Verfügung stellen:

- Deutsche Shell AG
- Fahrzeugwerkstätten Falkenried GmbH, FFG
- Hamburgische Electricitäts-Werke AG, HEW
- Hamburgische Landesbank
- Hein Gas Hamburger Gaswerke GmbH, HGW
- m - tec Gastechnologie GmbH
- Messer GmbH
- TÜV NORD Gruppe

1.2 Erfahrungen in Phase 1

Die Tankstelle und das erste Fahrzeug wurden im Januar 1999 in Betrieb genommen. Nach einer einjährigen Erprobungszeit des ersten Transporters wurden in 2000 fünf weitere Fahrzeuge auf Wasserstoff umgerüstet. Sowohl der Betrieb der Tankstelle als auch das Fahrverhalten und die Bedienerfreundlichkeit der Fahrzeuge entsprachen den Erwartungen und Zielsetzungen des Projekts. Dennoch war die Zuverlässigkeit der Fahrzeuge für einen universellen Einsatz noch nicht ausreichend.

1.2.1 Fazit und Ausblick

Die Umrüstung von Fahrzeugen für Wasserstoffbetrieb ist grundsätzlich möglich, allerdings haben die Fahrzeuge – bedingt durch den Prototyp-Status - noch nicht die technische Reife und Zuverlässigkeit von herkömmlichen Fahrzeugen. Der Betrieb der Tankstelle stellte sich als relativ unkritisch heraus. Durch das Projekt konnten die Einsatzmöglichkeiten von Wasserstoff im Verkehr erfolgreich demonstriert werden und so auch Akzeptanz für den neuen Kraftstoff Wasserstoff geschaffen werden.

Es ist absehbar, daß für den Einsatz von Wasserstoff in Flottenfahrzeugen Brennstoffzellenantriebe eindeutige Vorteile besitzen. Deshalb werden im Rahmen des Projekts W.E.I.T. in der kommenden Phase 2 Brennstoffzellen-Fahrzeuge eingesetzt. Das erste Brennstoffzellen-Lieferfahrzeug von Hermes Versand ist seit Herbst 2001 im Probeinsatz.

Der vorliegende Bericht zeigt die Ergebnisse der ersten Phase auf.

2 Hintergrund und Projektziele

Mit Wasserstoff fahren, neu ist diese Idee nicht. Bereits im Jahr 1807, lange bevor das Automobil durch Daimler und Benz und der Otto- oder Dieselmotor entwickelt wurde, gab es die erste Patentschrift für ein wasserstoffgetriebenes Fahrzeug des Schweizer Ingenieurs Isaac de Rivac. Nun sind seitdem fast 200 Jahre vergangen, und sowohl das Wasserstofffahrzeug als auch die Infrastrukturmaßnahmen zur Wasserstoffbetankung stecken immer noch in den Kinderschuhen.

Allerdings ist die Schuhgröße in den letzten Jahren erheblich gewachsen, bedingt durch die Vorteile des Wasserstoffs, die erst in unserer heutigen Zeit relevant wurden: Null-Emissionen im Vergleich zu Benzin- oder Dieselmotoren, die Herstellung von Wasserstoff ist nicht auf die knapper werdenden der fossilen Ressourcen angewiesen und die Verwendung von Wasserstoff trägt nicht zum sich abzeichnenden Treibhauseffekt bei.

Die nach wie vor wesentliche Herausforderung bei der Einführung von Wasserstoff als Kraftstoff sind die immensen Kosten, die mit einer Umstellung unseres jetzigen Versorgungssystems auf Wasserstoff verknüpft sind, dies bedeutet – kombiniert mit Brennstoffzellen und mittel- bis langfristig mit Wasserstoff aus erneuerbaren Energien – eine Umwälzung unserer heutigen Fahrzeugtechnologie und Treibstoffversorgung.

Angesichts dieser Herausforderung ist es sinnvoll und angebracht, die verschiedenen Aspekte der Einführung von Wasserstoff in den Verkehr anhand kleinerer Pilotprojekte zu testen und weiterzuentwickeln. Ein Beispiel hierfür ist das von der Hamburger Wasserstoff-Gesellschaft initiierte Projekt W.E.I.T. (Wasserstoff.Energie.Integration.Transport.), in dem sechs Lieferfahrzeuge Hamburger Unternehmen auf den Betrieb mit Wasserstoff umgerüstet wurden und die entsprechende Infrastruktur installiert wurde.

Erste Überlegungen zu W.E.I.T. resultierten aus der Machbarkeitsstudie des Europäisch-Kanadischen Wasserstoffprojekts EQHHPP¹, in dem 100MW Wasserstoff in Kanada produziert, nach Hamburg verschifft und dort eingesetzt werden sollten. Dieses Projekt wurde wegen der hohen Kosten nicht umgesetzt, allerdings zeigte schon die Machbarkeitsstudie Hinweise zum weiteren Vorgehen: Intensive Untersuchungen sind insbesondere bei dem energetischen Verbrauch von Wasserstoff notwendig, da hier weder eine Infrastruktur noch eine brauchbare und zuverlässige Technologie (Fahrzeuge, stationäre Anlagen) vorlagen. Auch Fragen der Genehmigung und Akzeptanz waren weitgehend ungeklärt.

Um die Entwicklung zu Wasserstoff als Kraftstoff weiterzuverfolgen und zu forcieren haben sich eine Reihe Hamburger Unternehmen in einem Projektverbund zusammengeschlossen, dessen Ziel die Realisierung des Projekts W.E.I.T. war. Wesentliche Kernpunkte von W.E.I.T. waren:

¹ Euro-Quebec Hydro-Hydrogen Pilot Project

- Umrüstung und Betrieb von sechs Mercedes-Sprinter Lieferfahrzeugen auf Wasserstoffbetrieb
- Betankungseinrichtung für Wasserstoff
- Einsatz der Fahrzeuge im realen Alltagsbetrieb
- Nutzung von regenerativer Energie zur Erzeugung von Wasserstoff
- Genehmigung von Tankstelle und Fahrzeugen
- Maßnahmen zur Akzeptanz

Das Projekt wurde in zwei Phasen geteilt. In der ersten Phase wurden Transportfahrzeuge mit konventionellen Benzinmotoren auf den Betrieb mit Wasserstoff umgerüstet und industriell erzeugter Wasserstoff als Treibstoff eingesetzt. Hauptanliegen dieser Phase war es, die Möglichkeit des Einsatzes von Wasserstoff zu zeigen, ohne dabei auf hoch technisierte Spezialsysteme angewiesen zu sein. In der zweiten Projektphase sollen hoch effiziente schadstofffreie, sogenannte Nullemissionsfahrzeuge mit Brennstoffzellenantrieb zum Einsatz kommen. Der Treibstoff Wasserstoff soll hierbei direkt an der Tankstelle vor Ort mittels eines Elektrolyseurs, der mit Grünem Strom aus erneuerbaren Energiequellen betrieben wird, erzeugt werden. Dadurch kann eine lückenlose saubere Energiekette von der Quelle bis zur Anwendung demonstriert werden.

2.1 Projektpartner und Management

Zur Abwicklung und Koordinierung des Projekts wurde 1997 von der Hamburger Wasserstoff-Gesellschaft die Projekt-Management Gesellschaft Hamburger Wasserstoff-Agentur GmbH (HaWA) gegründet.



Abbildung 1: Die Partner im Projektverbund W.E.I.T.

Finanziert wurde die Gesellschaft durch Beiträge der Projektteilnehmer, die ein Fahrzeug betrieben. Dies waren:

- HASPA Hamburger Sparkasse
- Hermes Versand Service
- HEW, Hamburgische Electricitäts-Werke AG
- HGW Hein Gas Hamburger Gaswerke GmbH
- HHA, Hamburger Hochbahn AG
- HOYER GmbH

Drei der Fahrzeugbetreiber (HOYER GmbH, HASPA und HGW) haben den Projektverbund vorzeitig verlassen.

Zusätzlich zu den Fahrzeugbetreibern wurde der Projektverbund durch eine ‚Know-how Gruppe‘ von Unternehmen unterstützt, die ihr jeweiliges Spezialwissen unentgeltlich zur Verfügung stellten:

Unternehmen	Know-how Bereich
- Deutsche Shell AG	Technischer Support, Schmierstoffe, Abgas-messungen
- Fahrzeugwerkstätten Falkenried GmbH, FFG	Umrüstung der Fahrzeuge von Benzin auf Wasserstoff-Betrieb, technische Wartung der Fahrzeuge
- Hamburgische Electricitäts-Werke AG, HEW	Geschäftsführung der HaWA GmbH
- Hamburgische Landesbank	Kaufmännische Betreuung
- Hein Gas Hamburger Gaswerke GmbH, HGW	Betrieb der Wasserstoff-Tankstelle
- m - tec Gastechnologie GmbH	Lieferung der Wasserstoff-Tankstelle
- Messer Griesheim GmbH	Wasserstoff-Lieferung
- TÜV NORD Gruppe	Muster-Zulassung der Fahrzeuge, technische Beratung

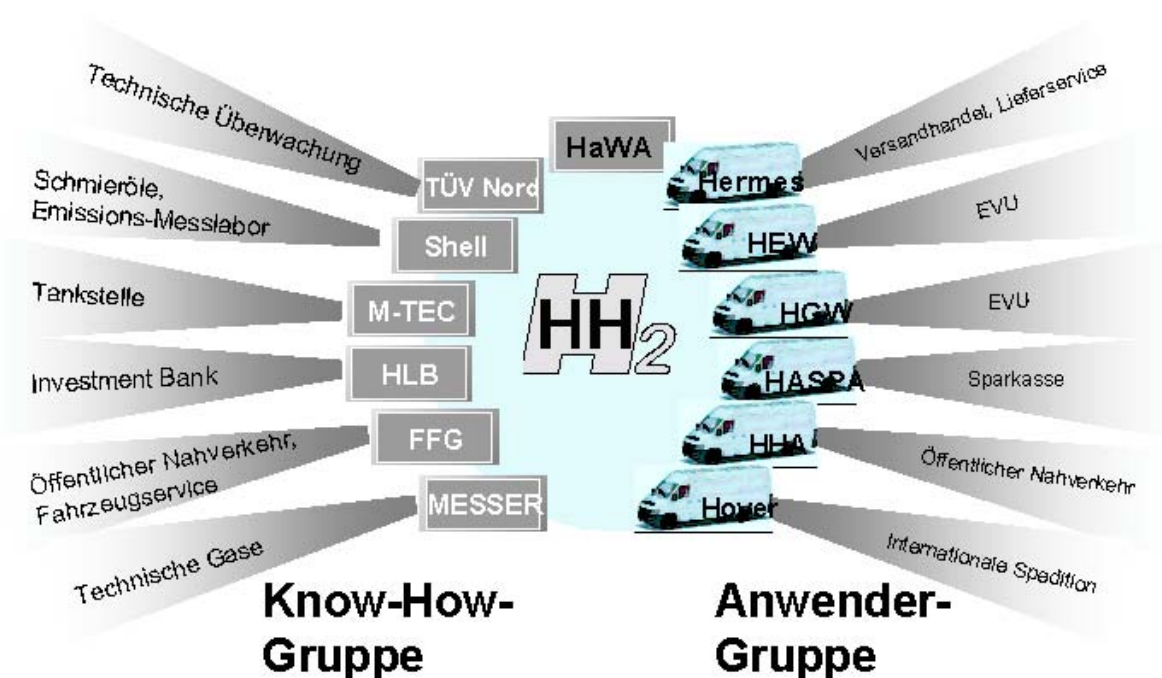


Abbildung 2: Die Beteiligten Firmen und ihre Rollen im Projektverbund

1997 wurde das Projekt mit der Planung der beiden Bereiche Fahrzeuge und Tankstelle/Infrastruktur begonnen.

3 Fahrzeuge

Bei den Fahrzeugen entschieden sich die Partner für einen Standard, um unnötige Anpassungen an verschiedene Fahrzeugtypen zu vermeiden. Gewählt wurde der Mercedes-Sprinter, ein kleineres Transportfahrzeug von DaimlerChrysler, dessen Motor auf den Betrieb mit Wasserstoff umgerüstet werden musste. Die Entscheidung zugunsten eines Verbrennungsmotors fiel, da zu dem damaligen Zeitpunkt noch keine Brennstoffzellenfahrzeuge verfügbar waren.



Abbildung 3: Die Fahrzeugflotte in Hamburg

3.1 Umrüstung der Fahrzeuge

Der Umbau der Motoren wurde von dem US-Unternehmen Hydrogen Components Inc (HCI) realisiert. Hierzu wurden von HCI als wesentliche Komponenten eine neue Kraftstoffdosiereinrichtung (CVI-Einheit) und ein modifiziertes Motormanagement (CPU) entwickelt.

Die Gesamtkosten für ein Fahrzeug betrugen 75T€, davon 25T€ für die Anschaffung des Standard-Fahrzeugs und 50T€ für die Umrüstung auf Wasserstoff.

3.1.1 Systemkomponenten

Zur Kraftstoffversorgung dienen drei Hochdruckflaschen mit jeweils 115l (insgesamt 345l) bei einem Speicherdruck von 200bar, die im Laderaum des Fahrzeugs untergebracht sind. Der Wasserstoff wird über eine Druckregelstrecke in die CVI-Einheit gespeist.



Abbildung 4: Hochdruckflaschen im Laderaum

Der Umfang der Fahrzeugumrüstung umfasste:

- 3 Compositeflaschen à 115 Ltr. mit Flaschenventilen in einer gasdichten Box im Laderaum
- Befüll- und Rückschlagventil mit Verrohrung
- Digitale Tank-Füllstandsanzeige und Druckmanometer
- Zwei Elektromagnetische Absperrventile (Hoch- und Niederdruckseite)
- Startsperr, auch wirksam über die Tankklappe
- Hoch- und Niederdruckregler, Dosierventil
- Zündanlage (4 Zündspulen mit Hochspannungseinheit)
- Sauerstoffsonde, Unterdruckgeber und Leerlaufventil
- CVI - Einheit (Constant Volume Injection)
- CPU- Elektronik (Central Processing Unit)

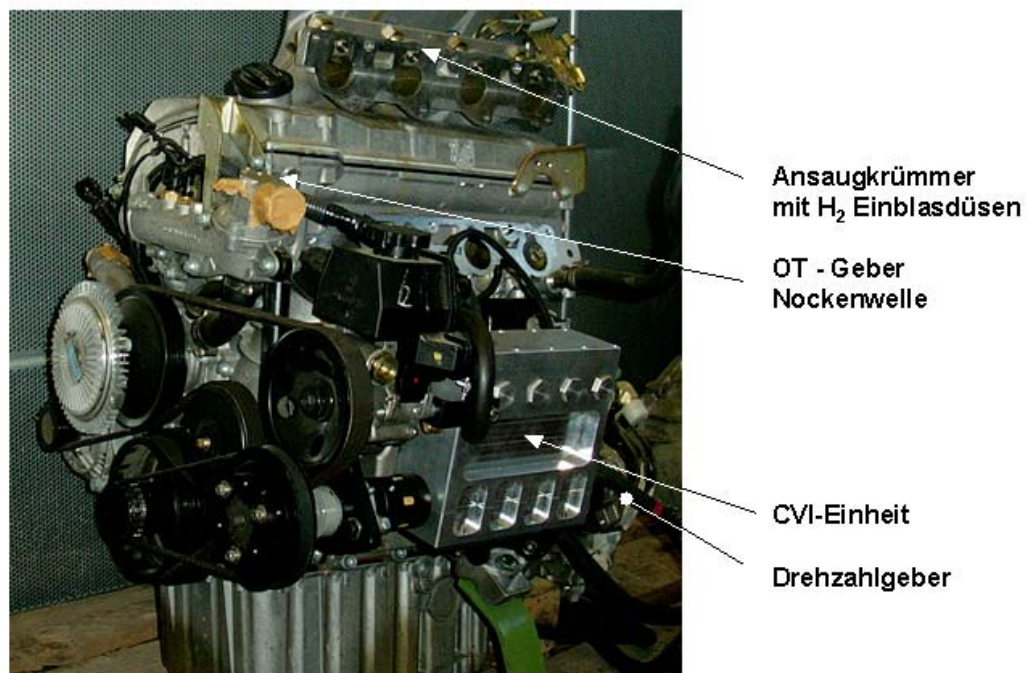


Abbildung 5: Motor mit H₂-Umrüstsatz

Die Fahrzeuge wurden in Hamburg mit Unterstützung von HCI durch FFG auf Wasserstoffbetrieb umgebaut.

3.1.2 Sicherheitsmaßnahmen

Bei der Umrüstung wurden eine Reihe von Sicherheitsmaßnahmen auf der Basis bestehender Vorschriften durchgeführt:

- Die Wasserstoffanlagen in den Fahrzeugen entsprechen im Aufbau und der Wirkungsweise den Richtlinien des TÜV
- Alle Bauteile haben eine Bauartzulassung für Wasserstoff
- Die gesamte Anlage ist einer Druckprüfung von 300 bar unterzogen worden - der Berstdruck liegt bei 600 bar
- Alle Wasserstofffahrzeuge sind mit einer Vielzahl sicherheitstechnischer Einrichtungen ausgestattet, wie
 - Flaschenventile mit Überdruckventil, Schmelzsicherung, Durchflussbegrenzer und Absperrventil
 - crashtsichere Anordnung aller Bauteile
 - bei abgestelltem Fahrzeug wird das System durch Magnetventile abgesperrt
 - bei der Betankung ist das Fahrzeug durch eine Startsperrung gesichert
 - das System ist zum Fahrzeuginnenraum gasdicht abgeschlossen

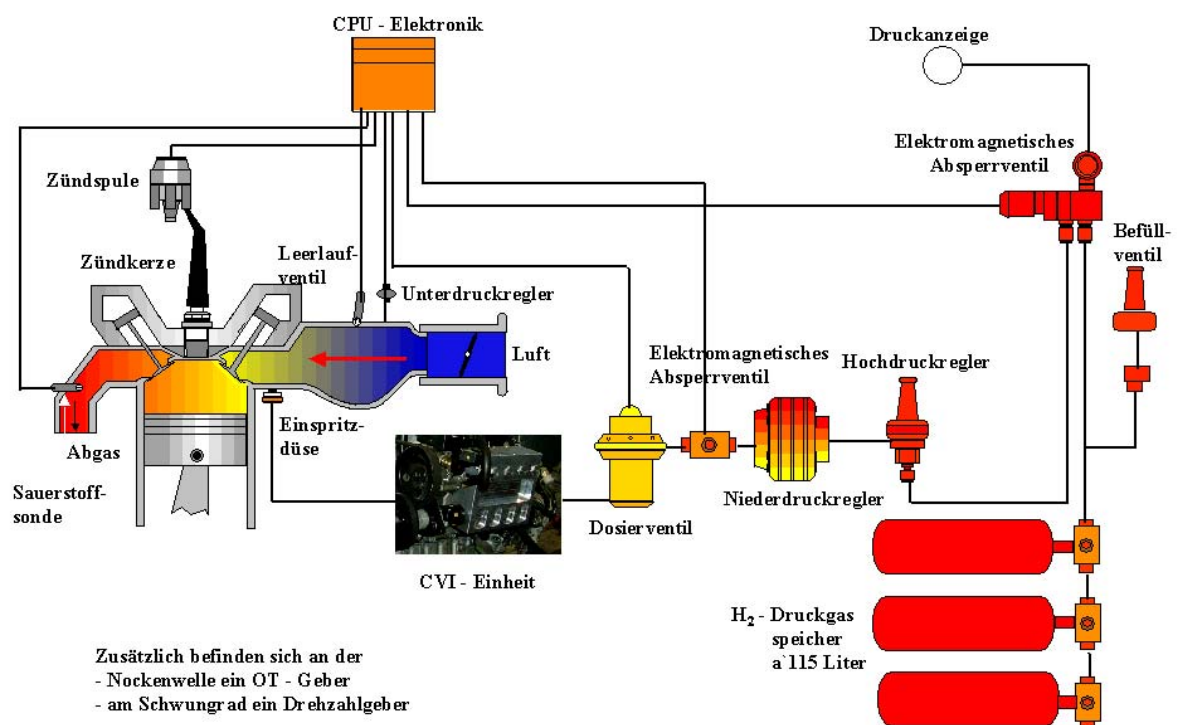


Abbildung 6: Schema Wasserstoff-Motor

3.1.3 Wartung

Für die Wartung und Prüfung der Fahrzeuge wurden insbesondere folgende Regularien festgelegt:

- die Wasserstoffanlagen unterliegen im Rahmen der jährlichen Fahrzeugwartung einer Funktions-, Sicht- und Dichtigkeitsprüfung
- die Compositeflaschen müssen alle 3 Jahre einer optischen und einer Druckprüfung unterzogen werden
- bei Werkstattaufenthalten, Wartungs- und Reparaturarbeiten sind die Flaschenventile grundsätzlich abzdrehen
- die Werkstatt muss ausreichend be- und entlüftet sein
- zur Sicherheit sollte in der Werkstatt ein Gasmessgerät verwendet werden

Grundsätzlich bestehen beim Wasserstoff keine anderen Sicherheitsvorschriften als bei komprimiertem Erdgas (CNG).

3.1.4 Fahrzeugzulassung

Im Zuge der Fahrzeugzulassung bzw. der Umrüstung von Benzin auf Wasserstoff mußten unter anderem folgende Punkte beachtet werden, die seitens des TÜVs bei der Abnahme überprüft wurden:

- stabiles Drehzahlverhalten, insbesondere im Leerlauf
- Anpassung der Servoaggregate, so dass auch im Leerlauf genügend Kraftreserve zur Verfügung steht
- Zügiges Ansprechend der CVI auf schnelle Lastwechsel
- Kurze Reaktionszeiten der Steuerelektronik bei wiederholtem Starten des Motors

Die Zulassung der sechs H₂-betriebenen Fahrzeuge durch den TÜV konnte anhand von Ausnahmegenehmigungen erreicht werden. Lediglich Anforderungen hinsichtlich Lärmschutz und Abgasmessung mußten entsprechenden den üblichen Prüfungen erfüllt werden.

3.1.5 Fahrzeugbetrieb

Nach der Umrüstung der Fahrzeuge wurden ein Leistungs- und Abgastest durchgeführt.

Es zeigte sich, dass erwartungsgemäß die Leistung der Motoren um ca. 25 - 30% gegenüber der Benzinversion sank. Allerdings war die verbleibende Leistung (40kW bei 3700rpm) ausreichend für die vorgesehenen Einsatzbereiche im innerstädtischen Verkehr. Sicherlich ist die reduzierte Motorleistung nicht befriedigend um alle Einsatzbereiche abzudecken. Auf die Option des Einbaus eines

Turboladers zur Leistungserhöhung wurde verzichtet, einerseits aus Kostengründen aber auch um die sensible Motorsteuerung nicht weiter zu verkomplizieren. Die Reichweite der Fahrzeuge mit ca. 100-130km ließ ebenfalls einen universellen Einsatz nicht zu. Hier sind in Zukunft Speichersysteme notwendig, die bei geringem Volumen höhere Mengen an Wasserstoff im Fahrzeug mitführen können.

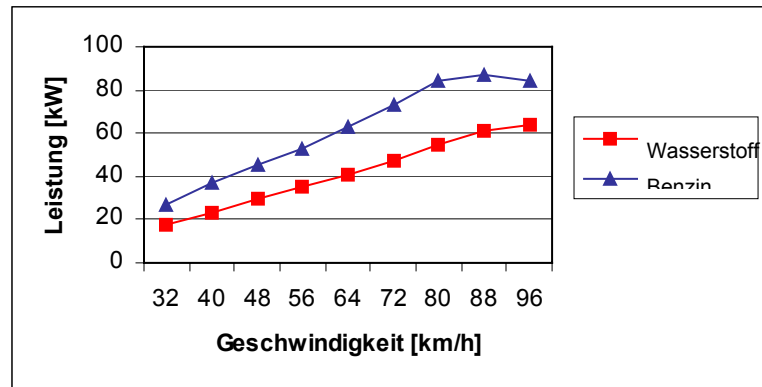


Abbildung 7: Leistungsvergleich Wasserstoff- und Benzinbetrieb

Die Abgasuntersuchungen hatten gezeigt, daß nahezu alle gängigen Schadstoffemissionen (CO, KWs) weit unterhalb der Grenzwerte lagen bzw. vernachlässigbar waren. Nur NOx-Emissionen lagen ohne weitere Maßnahmen zur Abgasbehandlung oder Motorsteuerung über den Grenzwerten – ein bekannter Effekt bei Wasserstoffmotoren durch die hohe Verbrennungstemperatur.

Um Zündungen von unverbranntem Wasserstoff bei nicht erfolgreichen Startvorgängen zu vermeiden, wurden direkt hinter den Auslaßventilen Katalysatoren von dmc² eingebaut, die den nicht umgesetzten Wasserstoff katalytisch umsetzen.

4 Tankstelle

Die Tankstelle wurde im Südosten Hamburgs auf dem Gelände der Hamburger Gaswerke installiert. Der Wasserstoff wurde jeweils mit einem Trailer geliefert und mittels eines Hydraulikverdichters in einem Zwischenspeicher auf den Tankdruck komprimiert. Über eine Zapfsäule mit Meßeinrichtung wurde der Wasserstoff durch eine Hochdruckkupplung in die Fahrzeuge gefüllt.

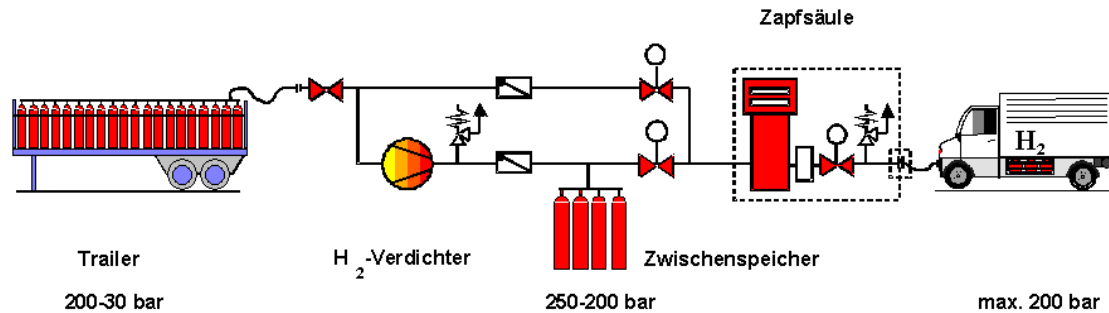


Abbildung 8: Tankstelle schematisch

4.1 Komponenten der Tankstelle

Entwickelt und geliefert wurde die Tankstelle von MANNESMANN DEMAG AG, ENERGIE- UND UMWELTECHNIK, Niederlassung München (MDEU) die jetzt unter M-TECH GmbH firmiert. Die Inbetriebnahme erfolgte am 12. Januar 1999.

Die wesentlichen Komponenten der Tankstelle sind in Tabelle 1 aufgelistet.

Tabelle 1: Technische Daten Wasserstoff-Tankstelle

- Trailer

max. Überdruck:	200 bar
min. Überdruck:	30 bar
max. Speichervolumen:	3200 m ³
nutzbares Normvolumen:	2700 m ³
- Verdichter bzw. Booster

Ausgangsüberdruck:	250 bar
Eingangsüberdruck:	200 bar / 30bar
Verdichterleistung:	940 m ³ /h / 115 m ³ /h
- Zwischenspeicher

Überdruck:	250 bar / 200 bar
nutzbares Normvolumen:	ca. 35 m ³
- Zapfsäule

zulässiger Abgabe-Überdruck:	200 bar
max. Abgabeleistung:	ca. 20 m ³ /min

Die verwendete Technik basiert auf ähnlichen Erdgastankstellen und wurde auf Wasserstoff angepasst. Sie erlaubt eine einfache Bedienung des Betankungsvorgangs, der von den Fahrern selbst durchgeführt werden kann.

4.1.1 Der Betankungsvorgang

Der Betankungsprozess startet durch Überströmen vom Trailer, der anfänglich mit einem Überdruck von 200 bar befüllt ist, in den Fahrzeugtank. Wenn die Durchflussmenge einen bestimmten Wert unterschreitet schaltet die Anlage automatisch auf den Zwischenspeicher, der mit einem Überdruck von 250 bar arbeitet, um. Der Fahrzeugtank wird dann bis zu einem Fülldruck von 200 bar befüllt. Der Betankungsvorgang wird seitens der Zapfsäule temperatur- und drucküberwacht. Im Fahrzeug sind keine weiteren Sicherheitseinrichtungen für die Betankung notwendig.



Abbildung 9: Wasserstoffversorgung mittels Trailer

4.1.2 Verdichter und Zwischenspeicher

Der Hydraulikverdichter dient dazu, den Zwischenspeicher jederzeit auf einem Druckniveau zu halten, damit die Betankung mit 200 bar sichergestellt ist. Da der Kompressor zweistufig ausgelegt ist, kann er über einen weiten Ansaugdruckbereich arbeiten. Daher kann der Trailer, dessen Fülldruck mit der H₂-Entnahme stetig sinkt bis zu einem Restüberdruck von ca. 30 bar entleert werden.

Der Zwischenspeicher besteht aus 15 Druckbehältern (Material: 34CrMo4) mit einem Gesamtvolumen von 1.155 Liter und maximal 275 bar.



Abbildung 10: H₂-Kompressor und H₂-Pufferspeicher

Tabelle 2: Technische Daten Zwischenspeicher

Außendurchmesser:	267,0 mm	+/- 1%
Wandstärke	10,4 mm	+ 40%
Länge	1.840,0 mm	+/- 5%
Gewicht ca.	92,0 kg	+/- 8%

Betriebsdruck	275 bar
Auslegungsdruck	275 bar
Prüfdruck	350 bar
Betriebstemperatur	-20 / + 70°C

4.1.3 Die Zapfsäule

Die Zapfsäule wurde auf dem Fundament einer ehemaligen Dieseltankstelle aufgestellt. Unmittelbar daneben wird eine Erdgaszapfsäule betrieben. Beide Zapfsäulen unterscheiden sich äußerlich kaum. Die Elektrik der Zapfsäule ist entsprechend der einschlägigen Sicherheitsbestimmungen aufgebaut.

An der Zapfsäule wird die abgegebene H₂-Menge in kg angezeigt. Die Mengenmessung erfolgt nach dem Coriolis-Prinzip.

Der elastische Tankschlauch hat zwei Leitungen für Füllgas und Gas, das ggf. rückgeführt wird. Die beiden Schläuche sind für max. 90 kg/min bzw. 20 kg/min dimensioniert. Schlauch und Zapfsäule sind über eine Abreißkupplung verbunden, die bei unbeabsichtigtem Losfahren während des Betankens auslöst.

Ein Not-Aus-Knopf an der Zapfsäule schließt augenblicklich sämtliche Sicherheitsventile und unterbricht den Betankungsvorgang. Der Innenraum der Zapfsäule ist als Ex-Zone I definiert. Der Bereich 20cm um und 1m über der Zapfsäule ist als Ex-Zone II definiert.

Zu Beginn des Tankens öffnet das Hauptventil und gasförmiger H_2 strömt vom Trailer in den Fahrzeugtank. Die Durchflussmenge wird über ein Meßgerät erfasst. Wenn die Durchflussmenge einen vorgegebenen Wert unterschreitet, wird die Verbindung zum Trailer geschlossen und ein Ventil zum Zwischenpuffer geöffnet.

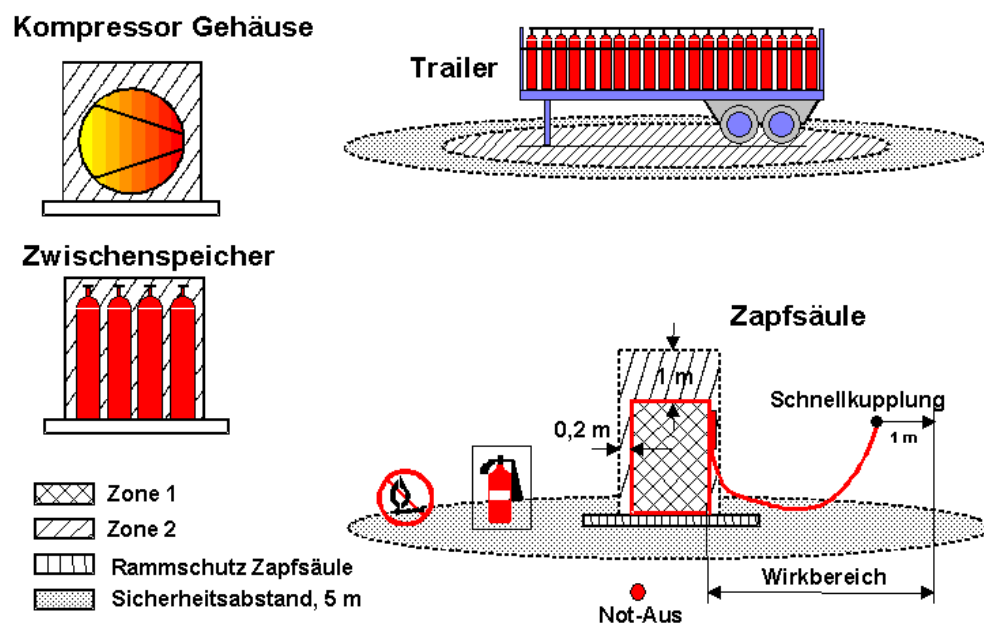


Abbildung 11: Sicherheitskonzeption der Tankstelle

Der Füllstutzen wurde von WEH hergestellt, Typ WEH TK 15, der Tankstutzen ist ebenfalls von WEH, Typ TN 5. Eine Verwechslung mit der Erdgaszapfpistole ist durch unterschiedliche Durchmesser ausgeschlossen. Die Zapfsäule ist eine modifizierte Version der Erdgaszapfsäule der Fa. Kraus, Kanada.

Die Rohre sind alle aus Edelstahl (1.4571). Wo möglich, sind sämtliche Verbindungen geschweißt, an sonsten kommen Swagelok-Verbindungen zum Einsatz. Die Magnetventile stammen von Kraus. Sicherheits- und Kontrollventile sind von HOFER, alternativ auch von NUPRO oder WHITY.

Der Trailerspeicher reicht für ca. 10 bis 14 Tage, bevor er durch einen anderen gefüllten Trailer ersetzt wird. Bei dem Trailer handelt es sich um einen "stand alone one-bank" 200 bar Trailer, wie er standardmäßig zum Straßentransport von H₂ benutzt wird. Dadurch konnten die Logistikkosten gering gehalten werden. Der Antransport erfolgte über normalen Straßentransport, wobei das Fassungsvermögen ca. 4.200 Nm³ bzw. 350 kg betrug.

4.2 Genehmigungsverfahren

Das generelle Genehmigungsverfahren zur Errichtung und zum Betrieb einer Tankstelle ist in der TRG 730 (TRG =Technischen Richtlinie Gas) zur Druckbehälterverordnung festgelegt. Entsprechend der TRG 730 leitet die Genehmigungsbehörde das Genehmigungsverfahren und involviert die Baubehörde. Wie in vielen anderen Fällen des BImSchG (Bundesimmissionsschutzgesetz) muß die Behörde die Genehmigung erteilen, wenn sämtliche Auflagen erfüllt werden.

Die Abnahmeprüfung und die periodisch wiederkehrenden Überprüfungen der Anlage sind in der TRG 790 geregelt.

Der Betrieb der Tankstelle wurde von den Hamburger Gaswerken, die auch ein H₂ Fahrzeug betreiben, durchgeführt. Zum Betrieb der Tankstelle wurden zwei getrennte Anträge bei den Genehmigungsbehörden eingereicht. Die Notwendigkeit dazu rührt einerseits aus der TRG 730 und andererseits aus der Tatsache, dass es sich um die erste Tankstelle für gasförmigen Wasserstoff handelt.

- Antrag auf Erlaubnis zur Errichtung einer H₂-Tankstelle
(im folgende als Bauantrag bezeichnet)
- Antrag zur Errichtung und zum Betrieb einer H₂-Tankstelle beim Amt für Arbeitsschutz (AfA, im folgenden Afa-Antrag genannt)

4.2.1 Bauantrag

Der Antrag wurde an die Freie und Hansestadt Hamburg, Bezirksamt Hamburg-Mitte, Bauabteilung/Bauprüfung gerichtet. Er bestand aus den folgenden Unterlagen:

- Beschreibung des Lieferumfangs von MDEU,
- Schemata,
- Lageplan der einzelnen Komponenten,
- Baubeschreibung,
- Grundbuchauszug und Projektbeschreibung.

4.2.2 AfA Antrag

In der TRG 730, Sektion 3 und 4 werden die Unterlagen aufgeführt, die einem entsprechenden Antrag beizufügen sind. Der AfA-Antrag wurde beim Amt für Arbeitsschutz der Freien und Hansestadt Hamburg, Behörde für Arbeit, Gesundheit und Soziales, eingereicht.

Er enthielt folgende Unterlagen:

- Beschreibung der Tankstelle,
- Betriebsbeschreibung entsprechend Herstellerangaben,
- Schemata,
- Lage der Tankstelle,
- Beschreibung des Lageplans sowie
- Lage und Entfernungen der einzelnen Komponenten und Ihrer Sicherheitszonen,
- Grundbuchauszug,
- Dokumentation der elektrischen Installation und Prüfprotokolle.

Alle Komponenten wie z.B. der Kompressor, die Zapfsäule und der Zwischenspeicher benötigen eine Bauartzulassung. Die entsprechenden Zertifikate sollten in der Anlagendokumentation des Herstellers beigelegt werden und dem TÜV übergeben werden. Wegen technischer Änderungen, die erst sehr spät erfolgten, war dies nicht möglich, so dass zunächst nur eine beschränkte Betriebserlaubnis erteilt wurde. Im späteren Betrieb der Anlage konnten die entsprechenden Unterlagen bzw. Tests nachgereicht werden, so dass sie entsprechende Erlaubnis erteilt werden konnte.



Abbildung 12: Zapfsäule und Tankstelle

4.3 Kraftstoffversorgung

Zur Versorgung der Tankstelle wurde der Wasserstoff mit Trailern geliefert. Der Wasserstoff stammte aus industrieller Produktion (Chlor-Alkali-Elektrolyse) und erfüllte noch nicht die Ansprüche der Projektbeteiligten an grünen Wasserstoff. Dieser Weg wurde aber in der Anfangsphase gewählt, da die knappen Projektressourcen auf die Umrüstung der Fahrzeuge und die Errichtung der Tankstellen konzentriert wurden.

In der Phase I wurden verschiedene Optionen zur Bereitstellung von grünem Wasserstoff geprüft, da ein wesentliches Ziel des Projekts die Realisierung der gesamten emissionsfreien Kette zur Kraftstoffversorgung war. Dieser so genannte well-to-wheel Ansatz beinhaltet die Erzeugung von Wasserstoff mit Strom aus erneuerbaren Energien.

Erste Untersuchungen hierzu wurden mit Island durchgeführt. Die isländische Stromversorgung basiert zu 100% auf erneuerbaren Energien (Wasserkraft und Geothermie) nutzt aber nur 17% des im Lande auch ökologisch möglichen Potentials. Allerdings zeigte sich, daß der Transport des Wasserstoffs in den für W.E.I.T. benötigten kleinen Mengen unwirtschaftlich ist und ein mehrfaches über den Produktionskosten von Wasserstoff in Island liegt. Ähnliches gilt für den Bezug von Wasserstoff aus Norwegen, der ebenfalls in die Untersuchung einbezogen wurde.

Ebenfalls untersucht wurde die Vor-Ort-Erzeugung von grünem Wasserstoff mittels Elektrolyse. Zur Versorgung der Elektrolyseanlage würde zertifizierter Grüner Strom verwendet. Diese Lösung wäre wesentlich kostengünstiger und würde die Anforderungen des Projekts an den emissionsfreien Verkehr erfüllen.

5 Erfahrungen

Die Tankstelle und das erste Fahrzeug wurden im Januar 1999 in Betrieb genommen. Nach einer einjährigen Erprobungszeit des ersten Transporters wurden in 2000 die weiteren Fahrzeuge auf Wasserstoff umgerüstet.

5.1 Fahrzeuge

Die Fahrzeuge wurden über einen längeren Zeitraum betrieben, die Erfahrungen lassen sich folgendermaßen zusammenfassen:

- Die TÜV-Zulassung erfolgte nach eingehender Prüfung auf Basis von Ausnahmegenehmigungen
- Problemloses Tanken von Druckwasserstoff an angepasster Tankstelle
- Fahrverhalten und Geräusch wie Benzin- oder Dieselmotor
- Normaler, eingewiesener Fahrer kann eingesetzt werden
- Reduzierte Lademöglichkeit wegen 345 l Tank auf Ladefläche



Abbildung 13: Fahrzeug an der H₂-Tankstelle

Der Unterschied der Wasserstoff- Fahrzeuge im Vergleich zu Standard-Diesel bzw. Benzinfahrzeugen gleichen Fahrzeugtyps (Mercedes Sprinter) stellt sich wie folgt dar:

Fahrzeugart	Reichweite	Leistung	Verbrauch je 100 km	Kraftstoff Kosten *)	CO ₂
Kraftstoff	km	kW	Liter Dieseläquivalent	€/ kWh	g/ kWh
Diesel	640	60	11,6	8	267
Erdgas	175	69	15,2	4,5	211
Wasserstoff	115	40	13,1	11	~ 0

*) Industrie-Wasserstoffpreis : 0,32 € / m³ (bei atmosphärischem Druck)

Anfängliche Schwierigkeiten beim Startvorgang sowie Testbetriebsfahrten, bei denen der Motor nicht die endgültige Betriebstemperatur erreichte, führte dazu, dass es im Brennraum zu Korrosion insbesondere am Gewinde der Zündkerzen kam. In Folge dessen verklemmten die Kerzengewinde im Motorkopf und konnte nicht ohne Beschädigung ausgebaut werden. Für die Korrosion des unlegierten ferritischen Stahls der Zündkerzen sind saure Kondensate im Brennraum in Betracht zu ziehen. Bei der Verbrennung des Wasserstoffs entsteht Wasser(dampf). Durch die angesaugte Luft wird Stickstoff mit eingetragen, der beim Verbrennungsprozess im Brennraum zu NO_x oxidiert wird. Die Stickoxide bilden in wässriger Phase salpetrige Säure².

Die Zuverlässigkeit der Fahrzeuge für einen universellen Einsatz konnte letztendlich nicht in ausreichendem Maß sichergestellt werden. Im Zuge der Anpassung und Optimierung der Betriebsparameter der CVI sowie der Platzierung und Einstellung der Sensoren konnte keine optimale Lösung gefunden werden. In Folge dessen mußten Betriebsparameter wiederholt angepasst werden. Insbesondere bei extremen Umweltbedingungen (sehr heiße Sommertage, niedrige Umgebungstemperaturen im Winter) zeigten sich Schwächen in der Leerlaufsteuerung und dem Leistungsverlauf. Die daraus resultierende eingeschränkte Verfügbarkeit der Fahrzeuge führte zum vorzeitigen Ausstieg von drei Projektpartnern. Die Hauptursache für die Schwierigkeiten lag in der Schnittstelle zwischen der CVI-Regeleinheit und dem komplexen Motormanagementsystem. Entsprechend dem hohen Entwicklungsstand des eingesetzten Benzinmotors ist dessen Motormanagement sehr feinfühlig und hoch komplex. Wesentliche Bestandteile des Systems konnten durch die CVI-Regelung nicht angesprochen werden, da sie - verständlicherweise als wesentliche Know-how Komponenten von DaimlerChrysler - für das Projekt nur als Blackbox zugänglich waren. Durch Unterstützung von DaimlerChrysler konnte dieses Problem zwar minimiert aber nicht vollständig beseitigt werden.

² Kurzbericht über eine Schadensuntersuchung an einer Zündkerze, TÜV Nord, Hannover, 1999

Bei Untersuchungen des Abgasverhaltens auf dem Prüfstand des Leistungszentrum Forschung Automotive Fluids der Deutsche Shell AG, PAE-Labor wurden unter anderem verschiedene Umgebungstemperaturen simuliert. Dabei zeigte sich bei tiefen Temperaturen ($\sim < -7^{\circ}\text{C}$) systembedingt eine größere sichtbare Wasserdampf Emission. Ähnliche Tendenzen zeigten sich beim Betrieb der Fahrzeuge bei tiefen winterlichen Temperaturen.

5.2 Tankstelle

Der Betrieb der Tankstelle stellte sich als relativ unkritisch heraus. Die hier gewonnenen Erfahrungen werden auch für die nächste Generation von Tankstellen mit höherem Druck (Tankdrücke von 350bar oder später auch 700bar) nutzbar sein. Folgende überwiegend positive Betriebserfahrungen liegen vor:

- Errichtung der H_2 -Tankstellen auf der Basis der technischen Regeln für Erdgastankstellen
- sicherheitstechnische Anforderungen wie bei Erdgastankstellen
- praktisch störungsfreier Betrieb
- geringfügige Undichtheiten in der Anfangsphase
- kurze Betankungszeiten
- Fahrer tankt selbständig
- beim Tankvorgang praktisch keine H_2 -Emissionen
- Hydraulikverdichter für dieses Tankstellenkonzept gut geeignet
- H_2 -Bereitstellung per Trailer problemlos
- Die Handhabung der Zapfpistole muß genauer als bei Erdgaszapfpistolen erfolgen. Die Pistole muss im richtigen Winkel auf den Tankstutzen gesetzt werden. Falls die Pistole verkantet kann die Dichtung beschädigt werden. Undichtigkeiten werden jedoch vom System sofort erkannt und mit einem lauten Pfeifton quittiert. Die Zapfpistole ist dennoch absolut betriebssicher, da das Tankventil nur bei korrektem Sitz geöffnet werden kann.
- Im Bereich des relativ schweren und unflexiblen Tankschlauchs und der Zapfpistole gibt es noch Optimierungspotential. Der Bedienungskomfort ist noch nicht auf gleichem Niveau wie bei einer herkömmlichen Tankstelle.

6 Fazit und Ausblick

Zusammenfassend ergibt sich folgendes Bild bei der Bewertung: Die Umrüstung von Fahrzeugen für Wasserstoffbetrieb ist grundsätzlich möglich, allerdings haben die Fahrzeuge – bedingt durch den Prototyp-Status - noch nicht die technische Reife und Zuverlässigkeit von herkömmlichen Fahrzeugen. Dies sowie firmeninterne Umstrukturierungen hatte zur Folge, dass die Projektpartner HGW, HOYER und HASPA die Fahrzeuge nicht in dem vorgesehenen Bereich einsetzen konnten und deshalb den Projektverbund vorzeitig verlassen haben. Bei den weiteren Projektbeteiligten wurden die Fahrzeuge in weniger kritischen Bereichen eingesetzt und zeigten, daß mit derartigen Projekten die Einsatzmöglichkeiten von Wasserstoff im Verkehr demonstriert werden und so auch Akzeptanz für den neuen Kraftstoff Wasserstoff geschaffen wird.



Abbildung 14: Mercedes Sprinter mit Brennstoffzellenantrieb (Quelle: DaimlerChrysler)

Es ist absehbar, daß für den Einsatz von Wasserstoff in Flottenfahrzeugen Brennstoffzellenantriebe eindeutige Vorteile besitzen. Deshalb werden im Rahmen des Projekts W.E.I.T. in der nächsten

Phase Brennstoffzellen-Fahrzeuge eingesetzt, ein erster Prototyp von DaimlerChrysler (basierend auf dem Mercedes-Sprinter) wurde von Hermes Versand Service 2001 in Betrieb genommen.



Abbildung 15: Brennstoffzellensystem im Fahrzeugboden des Mercedes Sprinter