

**Nationales Innovationsprogramm Wasserstoff- und  
Brennstoffzellentechnologie (NIP)**

**Clean Energy Partnership – CEP Phase II  
Weiterbetrieb von vier Bussen mit  
Wasserstoffverbrennungsmotoren  
SCHLUSSBERICHT**



**Förderkennzeichen: 03BV219**

**Bewilligungszeitraum: 01.02.2010-31.01.2015**

**Zuwendungsempfänger: Berliner Verkehrsbetrieb A.ö.R.**

Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Verkehr und digitale Infrastruktur unter dem Förderkennzeichen 03BV219 gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Autor.

## Inhalt

---

<b>Inhalt</b> .....	<b>2</b>
<b>A: Schlussbericht</b> .....	<b>3</b>
<b>A.1 Ausgangslage</b> .....	<b>3</b>
• A.1.1 Aufgabenstellung .....	4
• A.1.2 Rahmenbedingungen des Projekts .....	6
• A.1.3 Wissenschaftlicher und technischer Stand zu Projektbeginn .....	7
• A.1.3.1 Wissenschaftlicher und technischer Stand der Fahrzeugtechnologie .....	7
• A.1.3.2 Wissenschaftlicher und technischer Stand des Wasserstoffverbrennungsmotors .....	8
• A.1.3.3 Wissenschaftlicher und technischer Stand der Speichersysteme .....	11
• A.1.3.4 Wissenschaftlicher und technischer Stand der Standardisierung der Betankung.....	12
• A.1.4 Zusammenarbeit mit anderen Stellen .....	13
<b>A.2 Projektverlauf</b> .....	<b>14</b>
• A.2.1 Arbeitspaket 1: Busbetrieb.....	14
• A.2.2 Arbeitspaket 2: Fahrzeugwartung .....	19
• A.2.3 Arbeitspaket 3: Werkstattbetrieb .....	21
• A.2.4 Arbeitspaket 4: Datenanalyse und Auswertung der Betriebsergebnisse .....	22
• A.2.5 Arbeitspaket 5: Koordinierung und Management .....	23
<b>A.3 Projektevaluation</b> .....	<b>24</b>
• A.3.1 Verwendung der Zuwendung.....	24
• A.3.2 Ergebnisse und Zielerreichung .....	24
• A.3.3 Aufwand und Kosten.....	28
• A.3.4 Verwertbarkeit der Ergebnisse .....	28

## A: Schlussbericht

<i>ZE: (Zuwendungsempfänger)</i> <i>Berliner Verkehrsbetrieb A.ö.R.</i>	<i>Förderkennzeichen:</i> <i>03BV219</i>
<i>Vorhabenbezeichnung:</i> <i>CEP - Weiterbetrieb von vier Bussen mit Wasserstoffverbrennungsmotoren</i>	
<i>Laufzeit des Vorhabens:</i>	<i>01.02.2010-31.01.2015</i>
<i>Berichtszeitraum :</i>	<i>01.02.2010-31.01.2015</i>

### A.1 Ausgangslage

Die Clean Energy Partnership (CEP) ist das größte Demonstrationsprojekt für Wasserstoffmobilität in Europa und ein Leuchtturmprojekt des Nationalen Innovationsprogramms Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie (NIP). Gegründet 2008, ist das wesentliche Projektziel der CEP in ihrer dritten Phase (2011 bis 2016) die Marktvorbereitung von Wasserstoff als Kraftstoff. Neben dem verstärkten Ausbau des Tankstellennetzes liegt in dieser Phase der Fokus im breit angelegten Betrieb von wasserstoffgetriebenen Fahrzeugen, um weitere Erkenntnisse über die Schnittstellen zwischen Fahrzeug, Kunde und Infrastruktur zu erlangen. Insbesondere folgenden Zielen haben sich die Fahrzeughersteller innerhalb der CEP verschrieben:

- das technische Update von Fahrzeugen - Pkw ebenso wie Bussen - und Infrastruktur auf den neuesten Stand / die nächste Generation,
- die Realisierung von technologischen und operativen Verbesserungspotenzialen durch Umsetzung der „Lessons Learned“ aus CEP Phase I und II, sowie
- die Erprobung der Technik unter Alltagsbedingungen.

Vor diesem Hintergrund ist eine rasche Weiterentwicklung des Brennstoffzellenantriebs, der in den mehr als 10 Jahren seit Einführung der ersten Fahrzeuge in der CEP enorme Fortschritte machen konnte, die Marktreife aber noch nicht in vollem Umfang erreicht hat, von elementarer Bedeutung, um mit der Markteinführung des Kraftstoffs auch die Markteinführung der Fahrzeuge sicherzustellen. Als Forschungsziele haben sich die Fahrzeughersteller daher die weitere Optimierung der Fahrzeugeffizienz, die Erhöhung der Leistungsfähigkeit und die Verbesserung der Zuverlässigkeit gesetzt.

Neben der Demonstration von wasserstoffbetriebenen Fahrzeugen für den Individualverkehr (Pkw) zielen die Phasen II und III auch auf die Demonstration und den Flottenbetrieb von Wasserstoffbussen. Der hierdurch steigende Wasserstoffbedarf hat insbesondere Implikationen auf Fragen der Wasserstoffbereitstellung. Als herausragendes Projekt ist die CEP ein wichtiges Element, um die für den Verkehrsbereich definierten Ziele des NIP zu erreichen. Insbesondere trägt es maßgeblich bei

- zur Identifikation und Überwindung von Kommerzialisierungshindernissen,
- zum Ausbau der Fahrzeugflotten,
- zur Erweiterung der Infrastruktur, deren Schlüsselrolle identifiziert wurde und die als limitierender Faktor ausgeschlossen werden soll

- und zur zunehmenden Einbindung alternativer, insbesondere erneuerbarer Energiequellen für die Wasserstoffproduktion.

Das hier beschriebene Vorhaben „Weiterbetrieb von vier Bussen mit Wasserstoffverbrennungsmotoren“ diente vorwiegend Forschungs- und Demonstrationszwecken und bildete zur Erreichung der genannten Ziele einen wesentlichen Baustein innerhalb der CEP. Im Zentrum des Fördervorhabens betrieben die Berliner Verkehrsbetriebe (BVG) im Rahmen der CEP insgesamt 4 mit Wasserstoffverbrennungsmotoren betriebene Omnibusse. Diese wurden ausführlich unter realen Betriebs- und Umgebungsbedingungen erprobt und technisch betreut. Darüber hinaus wurden umfassende Betriebsdatenanalysen zum Verbrauch sowie zur Betankung erhoben, die in das Wissens- und Informationsmanagement der CEP einfließen.



*Abbildung 1: Selbstdarstellung der CEP mit BVG-Wasserstoffbus*

### A.1.1 Aufgabenstellung

Die Verwendung von Wasserstoff als Kraftstoff war für die Berliner Verkehrsbetriebe (BVG) eine wichtige Option in der Umsetzung ihrer Nachhaltigkeitsstrategie. Ziel der Forschungsaktivitäten der BVG im Zuge dieses Projekts war es, die Wirtschaftlichkeit von Wasserstoff als Kraftstoff im öffentlichen Personentransport zu eruiieren und zu evaluieren, ob Wasserstoffbusse mit Verbrennungsmotoren perspektivisch in die Busflotten des öffentlichen Personennahverkehrs (ÖPNV) eingeführt werden können. Bereits seit Juni 2006 setzte die BVG dazu im innerstädtischen öffentlichen Personennahverkehr Busse ein, die mit Wasserstoff betrieben wurden: Insgesamt 15 Eindecker-Wasserstoffomnibusse fuhren für die BVG, davon waren 14 Busse im Rahmen des europäischen Projekts HyFLEET:CUTE mit Wasserstoff-Verbrennungsmotoren ausgestattet; ein aus Bundesmitteln gefördertes Fahrzeug verfügte über einen Brennstoffzellen-Antrieb. Vier der mit Verbrennungsmotoren ausgestatteten Busse wurden in die CEP überführt, während zehn dieser Fahrzeuge vom Hersteller MAN mit neuentwickelten Turbomotoren ausgestattet worden waren, die sich bereits im Rahmen des Vorhabens HyFLEET:CUTE als nicht ausreichend zuverlässig erwiesen hatten und entsprechend nicht in den Langzeittest übernommen wurden.



Ziel des hier zum Abschluss gebrachten CEP-Projektmoduls war der Weiterbetrieb dieser vier mit Saugermotoren ausgestatteten Fahrzeuge unter realistischen innerstädtischen Verkehrsbedingungen im Liniendienst der BVG über einen Zeitraum von fünf Jahren (01.02.2010-31.01.2015).



Abbildung 2: Wasserstoffbusse der BVG im Liniendienst fotografiert (Quelle: [www.bus-bild.de](http://www.bus-bild.de))

Erstmals konnte im Rahmen dieses Vorhabens die **Langzeiterprobung eines Fahrzeugs mit Wasserstoffverbrennungsmotor** realisiert werden. Niemals zuvor wurden entsprechende Antriebskomponenten über einen Zeitraum von rund 8,5 Jahren erprobt, der der normalen Verweildauer eines Dieselfahrzeugs in der Flotte eines ÖPNV-Betreibers entspricht. Schwerpunkte der Forschung lagen dementsprechend im Wesentlichen in der gründlichen **Evaluierung des Langzeitbetriebs** und in der **Bewertung der Standfestigkeit der Technologie** hinsichtlich des **Alterungsverhaltens**, der **Lebensdauer** und der **Zuverlässigkeit der Komponenten** des Wasserstoffantriebsstrangs.

Das Vorhaben, welches die Marktvorbereitung für Wasserstoff als Kraftstoff als Ziel konsequent vor Augen hatte, zielte insbesondere auf die nachhaltige Fortführung bereits begonnener Maßnahmen: Neben dem **Weiterbetrieb** der vier Wasserstoffbusse – und damit auch der Sicherstellung der Auslastung der Wasserstoffinfrastruktur in Berlin – zielte das Projekt ganz wesentlich auf die Entwicklung eigenen **Knowhows**, um die Durchführung sämtlicher **Service- und Reparaturleistungen** durch hauseigene Techniker der BVG sicherzustellen. Dies umfasste auch die Übernahme von bisher ausschließlich vom Fahrzeughersteller erbrachten Leistungen am Wasserstoffteil des Fahrzeugs. Dazu wurde die **bestehende Werkstatt** für Wasserstoffbusse auf dem BVG-Betriebshof Spandau an der Heerstraße weiterbetrieben. Neben der **kontinuierlichen Sicherstellung der Betriebsbereitschaft** der Fahrzeuge stand die **umfassende Auswertung der Betriebsergebnisse mit Blick auf Wirtschaftlichkeit und Zuverlässigkeit der Technologie** im Zentrum des Vorhabens.

Der Betrieb der Wasserstoffbusse auf einer regulären Linie des ÖPNV und die Teilnahme an Fahrveranstaltungen im Zusammenhang mit CEP-Außendarstellungen ermöglichten darüber hinaus die öffentlichkeitswirksame Präsentation der Wasserstofftechnologie – wertvolle Erfahrungen im Bereich der öffentlichen Wahrnehmung und Nutzerakzeptanz konnten so gesammelt werden. Ein gutes Beispiel für das Interesse der Öffentlichkeit an der Wasserstofftechnologie ist das Portal <http://www.bus-bild.de/> (vgl. Abb. 2), auf dem regelmäßig Bilder der Wasserstoffbusse gepostet wurden.

Für die weitere Entwicklung von Wasserstoff als Kraftstoff verfolgte das Vorhaben insbesondere die folgenden elementaren **Ziele**:

- Nachweis einer hohen, dem Diesel-Antriebsstrang vergleichbaren Langzeitstandfestigkeiten der eingesetzten Technologien,
- Nachweis der Wirtschaftlichkeit der Technologie über den gesamten Lebenszyklus,
- Auslastung bestehender Infrastrukturen durch hohe Abnahmemengen, wie sie durch den Betrieb von Pkw allein im Rahmen der CEP nicht erreicht werden konnten,
- Umfassender Know-how-Aufbau im Umgang mit der Wasserstofftechnologie beim Betreiber durch Übernahme der Serviceverantwortung vom Fahrzeughersteller.

### A.1.2 Rahmenbedingungen des Projekts

Im Rahmen des EU-geförderten Vorhabens HyFLEET:CUTE (Laufzeit: 01/2006-12/2009) nahmen die Berliner Verkehrsbetriebe zwischen Juni und Oktober 2006 vier 12-m-Standardstadtbuse vom Fahrzeughersteller NEOMAN mit Wasserstoffverbrennungsmotoren in Betrieb und setzten sie im normalen Liniendienst ein. Die Fahrzeuge vom Typ MAN Lion's City waren im ersten Halbjahr 2006 von der NEOMAN Bus GmbH in Salzgitter aufgebaut worden und bedienten ab Anfang Juni 2006 im Rahmen der Green Goal Initiative der FIFA zur Fußballweltmeisterschaft zunächst für 6 Wochen einen Shuttle-Dienst für Journalisten zwischen dem Flughafen Tegel und dem Olympiastadion. Im weitgehend problemlosen Alltagsbetrieb über die nächsten vier Jahre konnten hilfreiche Erkenntnisse zur Weiterentwicklung der Fahrzeuge gewonnen werden. So wurde etwa die Nachrüstung eines zusätzlichen Kühlers erforderlich, um den insgesamt höheren Verbrennungstemperaturen im Motor Rechnung zu tragen. Diese vier Busse wurden nach Ende des EU-Vorhabens in das hier abgeschlossene Projekt und in den Liniendienst der BVG überführt, während zehn ebenfalls im Rahmen des EU-Projekts aufgebaute Fahrzeuge mit Wasserstoffturbomotoren aus technischen Gründen nicht übernommen wurden.

Seit Herbst 2010 engagierte sich die BVG im HyFLEET:CUTE-Nachfolge-Projekt „Clean Hydrogen in European Cities (CHIC)“, welches die EU im Rahmen der „Joint Technology Initiative (JTI)“ förderte. Als sogenannter Phase-0-Partner war die BVG im Rahmen dieses Vorhabens maßgeblich am Daten-, Informations- und Erkenntnisaustausch mit Flottenbetreibern anderer europäischer Städte beteiligt, ohne allerdings eine weitere Förderung in Anspruch zu nehmen. Dadurch konnte das Projekt auch auf europäischer Ebene maßgeblich an Relevanz gewinnen und zum Erfolg einer gesamteuropäischen Marktvorbereitungsstrategie beitragen.

Um unnötige An- und Abfahrten zu vermeiden und aufgrund der im Vergleich zu Dieselnissen begrenzten Reichweite der Fahrzeuge, erfolgte der Betrieb in der Regel auf Linien im Umfeld des Betriebshofs Spandau. Schwerpunktartig wurden die Busse auf der Linie X49 eingesetzt, die durch relativ wenige Haltestellen ein verbrauchsarmes Fahren bei einer vergleichsweise hohen Reichweite erlaubte. Zur technischen Betreuung der Wasserstoffbusse war auf dem Betriebshof der Berliner Verkehrsbetriebe an der Heerstraße zwischen Juni 2006 und September 2007 eigens eine Werkstatt errichtet worden, die mit einer Betreuungskapazität von bis zu 20 Bussen auch einen deutlichen Ausbau der bestehenden Flotte erlaubt hätte. Der Betrieb der Werkstatt wurde im Zuge des Projekts fortgesetzt.

### A.1.3 Wissenschaftlicher und technischer Stand zu Projektbeginn

Grundsätzlich wurde zu Projektbeginn davon ausgegangen, dass die Markteinführung von Wasserstoff als Kraftstoff zunächst in Busflotten erfolgen würde, da die logistischen Herausforderungen für die Kraftstoffbereitstellung ungleich leichter zu bewerkstelligen waren als für Pkw, die nicht in Flotten betrieben werden. Die im Projekt eingesetzten Technologien waren zu Projektbeginn im Wesentlichen bereits bekannt: Die Entwicklung von Wasserstoffverbrennungsmotoren hatte bereits viele wesentliche Hürden genommen, ohne dass jedoch Dauerbelastungstests über den gesamten Lebenszyklus bis dato durchgeführt worden waren. Der Fokus im Projekt wurde daher wesentlich auf die Alterungserscheinungen unter Realbedingungen im städtischen Linienverkehr gelegt.

#### A.1.3.1 Wissenschaftlicher und technischer Stand der Fahrzeugtechnologie

Bereits 1996 stellte MAN den weltweit ersten Wasserstoffbus mit Flüssigwasserstoff-Speicherung und Verbrennungsmotor der Öffentlichkeit vor. Dieser wurde für zwei Jahre im regulären öffentlichen Nahverkehr in München und Erlangen eingesetzt. Drei Jahre später startete MAN mit der Erprobung von drei Niederflrigelenkbussen mit Druckwasserstoff-Verbrennungsmotor.

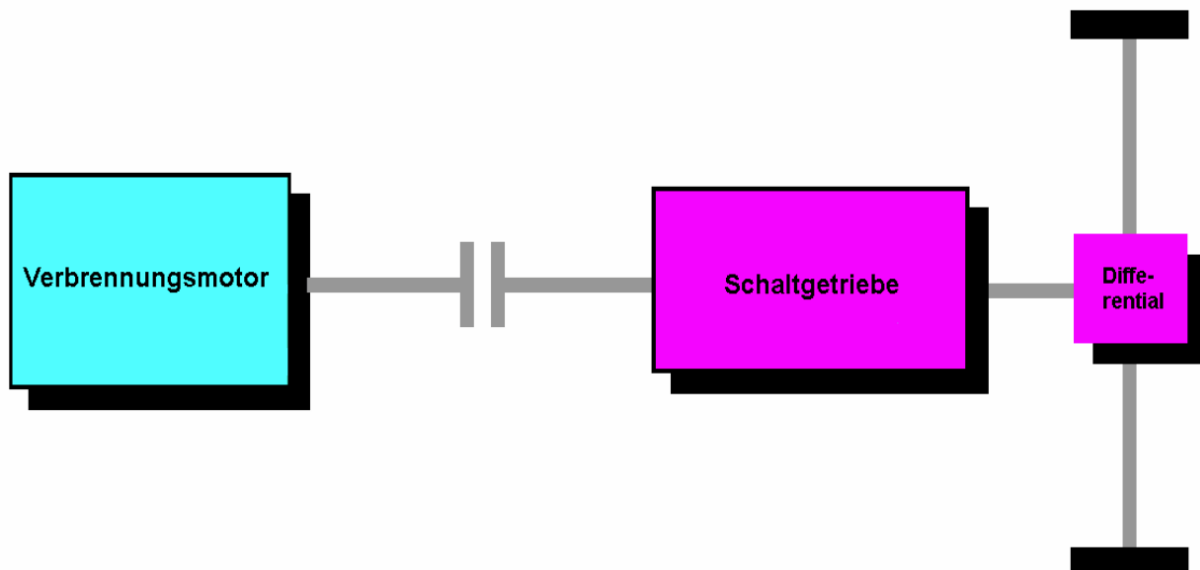


Abbildung 3: Antriebsstrang eines Wasserstoffverbrennungsmotors

Die im Projekt zum Einsatz gekommenen Busse waren Modelle der MAN Niederflur-Stadtbusreihe „Lion’s City“ – eine Modelreihe, die nicht nur auf die Anforderungen des städtischen Linienverkehrs, sondern auch insgesamt auf nachhaltige Wirtschaftlichkeit ausgerichtet ist. Die gesamte Reihe, ob mit Dieselmotor, CNG-Antrieb, Hybrid-Technologie oder Wasserstoffverbrennungsmotor ausgestattet, erfüllte die Abgasnorm „Euro 5“ und erhielt in Deutschland das Umweltzeichen „Blauer Engel“ mit dem Zusatz „Schützt UMWELT und GESUNDHEIT“. Da der Motor Kohlenwasserstoffverbindungen, Kohlenmonoxid, Stickoxide und Partikel in sehr geringem Maße emittiert (zurückzuführen ist dies auf den beim Verbrennungsmotor unvermeidlichen Ölverbrauch sowie die Verbrennung mit der Umgebungsluft), wurden in den Bussen 3-Wege-Katalysatoren verbaut, um die Euro-5-Norm einhalten zu können. Insgesamt lagen die Abgasemissionen des Wasserstoffmotors weit unterhalb der Euro-5-Norm.

Wesentliches Merkmal der Busse ist die konsequente Einhaltung der festgelegten Obergrenzen für Lärmemissionen. Neben den Antrieben sind auch weitere Komponenten auf die Umweltverträglichkeit ausgerichtet. Die verbaute Klimaanlage-Generation beispielsweise ist wesentlich leichter als bisherige Klimaanlagen, was sich auch im reduzierten Kraftstoffverbrauch

widerspiegelt. Die weiterentwickelte Elektronikstruktur erhöht zudem die Zuverlässigkeit und verbessert die Bediensicherheit.

Auf dem Dach befindet sich das Speichersystem für gasförmigen Wasserstoff aus zehn Druckbehältern mit jeweils 205 Litern Fassungsvermögen. Der maximale Betriebsdruck beträgt 350 bar bei einer Nenntemperatur von 15 °C, die Gesamtkapazität beträgt 2.050 l (= rd. 45 kg) Wasserstoff. Die zugehörige Betankungseinheit ist zentral unter einer Klappe neben der vorderen Tür angebracht. Nachdem der Befüllstutzen auf den Füllanschluss aufgesetzt und der Absperrhahn zum Speichersystem geöffnet wurde, kann der Wasserstoff in die Druckbehälter strömen. Der Befüllzustand kann über ein zugehöriges Manometer kontrolliert werden. Die wasserstoffrelevanten Ventile sind im Motorraum untergebracht. Dazu gehört ein Hochdruckregler, der hinter einem Magnetsperrventil angeordnet ist, und den Wasserstoff vom maximalen Tankspeicherdruck von 350 bar auf 5,5 bar entspannt. Anschließend folgt ein Niederdruck-Sicherheitsventil, das bei 10 bar Überdruck öffnet und das Gas über eine Rohrleitung über dem Fahrzeugdach ins Freie ableitet. Dadurch wird verhindert, dass bei einem fehlerhaft arbeitenden Hochdruckregler Beschädigungen am Niederdruckteil auftreten.

Die wesentlichen technischen Daten der Fahrzeuge sind in Abbildung 4 zusammengefasst.

<b>Fahrzeug</b>	Modell	MAN-Niederflurbus Lion's City
	Gesamtlänge	12 m
	Höhe, Breite	3,40 m / 2,50 m
	Zulässiges Gesamtgewicht	18 t
	Zuladung	> 80 Fahrgäste
	Reichweite	> 200 km
Höchstgeschwindigkeit	80 km/h	

Abbildung 4: Technische Daten der Wasserstoffbusse

#### A.1.3.2 Wissenschaftlicher und technischer Stand des Wasserstoffverbrennungsmotors

Der Wasserstoffverbrennungsmotor ist dem Prinzip nach ein konventioneller Verbrennungsmotor, der mit Wasserstoff als Kraftstoff betrieben wird. Er gilt als Brückentechnologie auf dem Weg zur Elektromobilität mit Brennstoffzellenantrieb. Die Motoren zeichnen sich dadurch aus, dass sie nur geringfügige HC- und CO<sub>2</sub>-Emissionen aus der Schmierölverbrennung sowie geringe CO-Emissionen verursachen. Die Funktionsweise ist vergleichbar zu herkömmlichen Otto-Motoren, nur dass nicht die Explosion von Benzin, sondern eine Knallgasreaktion mit Wasserstoff in einem Kolbenrotationszylinder als Grundlage des Antriebs dient. Die gleiche Struktur erlaubt den Bau von bivalenten Fahrzeugen, also von Fahrzeugen, die wahlweise mit herkömmlichem Treibstoff oder Wasserstoff gefahren werden können. Dabei ist es unerheblich, ob der Wasserstoff zuvor gasförmig oder flüssig gespeichert wird – denn zur Verbrennung wird er dem Motor wieder gasförmig zugeführt.

Die **Vorteile dieses Antriebskonzeptes** liegen vor allem darin, dass die Wasserstoffmotoren als Verbrennungskraftmaschinen **seit Jahrzehnten erprobt und höchst zuverlässig** sind. Aufgrund ihrer zu klassischen Verbrennungsmotoren vergleichbaren Bauweise ist eine relativ **schnelle Serieneinführung der Wasserstoffmotoren für den Einsatz in Stadtbussen möglich**, da existierende Produktionsprozesse weitgehend genutzt werden können und das Antriebssystem ohne großen technischen Aufwand in existierende Fahrzeugkonzepte integriert werden kann. Dementsprechend sind die **Systemkosten bedeutend niedriger** als bei anderen in der Entwicklung befindlichen



Konzepten. Zudem sind die Ansprüche an die Reinheit des Wasserstoffes geringer als bei der Brennstoffzelle, die hochreinen Wasserstoff benötigt.



*Abbildung 5: Wasserstoffverbrennungsmotor H2876 UH01 (150 kW)*

Wie beim Otto-Motor wird auch beim Wasserstoffverbrennungsmotor zwischen der inneren und äußeren Gemischbildung unterschieden. Bei der inneren Gemischbildung wird der Wasserstoff direkt in den Verbrennungsraum eingeblasen, was den Vorteil der präzisen Portionierung hat. Bei diesem Mischungsverfahren wird gasförmiger Wasserstoff unter hohem Druck (80-120 bar) direkt in den Verbrennungsraum eingespritzt, dann abgekühlt und mit einer Zündkerze gezündet (die Zündtemperatur von Wasserstoff liegt mit 560 °C bis 600 °C weit über der von Dieselmotoren und Benzin). Die größte Herausforderung im Rückgriff auf Wasserstoffverbrennungsmotoren ist neben der Realisierung von hohen Drücken die Sicherstellung der Dichtigkeit des Systems, was den Rückgriff auf die innere Gemischbildung bei Wasserstoffverbrennungsmotoren insgesamt technisch sehr aufwändig gestaltet.

Bei der äußeren Gemischbildung hingegen wird der unter Druck gespeicherte Wasserstoff mit geringem Überdruck in das Ansaugrohr eingeblasen (wenn der Kraftstoff als flüssiger Wasserstoff im Kraftstofftank gespeichert wird, muss er auf dem Weg zum Ansaugkanal erwärmt werden um dort gasförmig anzukommen). Dort vermischt er sich mit der Luft und wird anschließend im Verbrennungsraum gezündet. Die Herausforderung ist hierbei, dass bereits außerhalb des Motors ein zündfähiges Gemisch entsteht, weshalb die Gefahr der Rück- oder Glühzündung besteht: Da das Wasserstoff-Sauerstoff-Gemisch über eine sehr geringe nötige Zündenergie von 0.017 mJ verfügt, kann sich das Gemisch bereits im Ansaugtrakt an heißen Ecken im Verbrennungsraum entzünden und dann ins Ansaugrohr zurückschlagen.

Der Wirkungsgrad von Wasserstoffverbrennungsmotoren ist mit bis zu 45 % besser als der von Benzinmotoren, die über eine Effizienz von bis zu 38 % verfügen, da die Zünd- und Diffusionsgeschwindigkeit des Wasserstoffgemisches höher als die des Benzin-Luft-Gemisches ist. Zudem verbrennt der Wasserstoff mit thermodynamisch günstiger sehr heißer Flamme. Dennoch ist die Leistung von Wasserstoffverbrennungsmotoren niedriger als bei Otto-Motoren, da der Energiegehalt des Wasserstoffes pro Kubikmeter Gas niedrigerer, gleichzeitig der Volumenanteil des Wasserstoffes am Gas-Luft-Gemisch jedoch höher ist. Im Vergleich zur Brennstoffzelle ist der Wirkungsgrad der Wasserstoffverbrennungsmotoren nicht wesentlich schlechter, da Brennstoffzellen für LKW derzeit eine Effizienz von 45–50 % aufweisen – allerdings ist die Verlässlichkeit der Wasserstofftechnologie auf Grundlage von Verbrennungsmotoren und damit die Betriebssicherheit

im Vergleich zur Brennstoffzellentechnologie aktuell noch wesentlich höher, wie das hier abgeschlossene Projekt eindrücklich unter Beweis stellen konnte (vgl. Kap. A3.2).

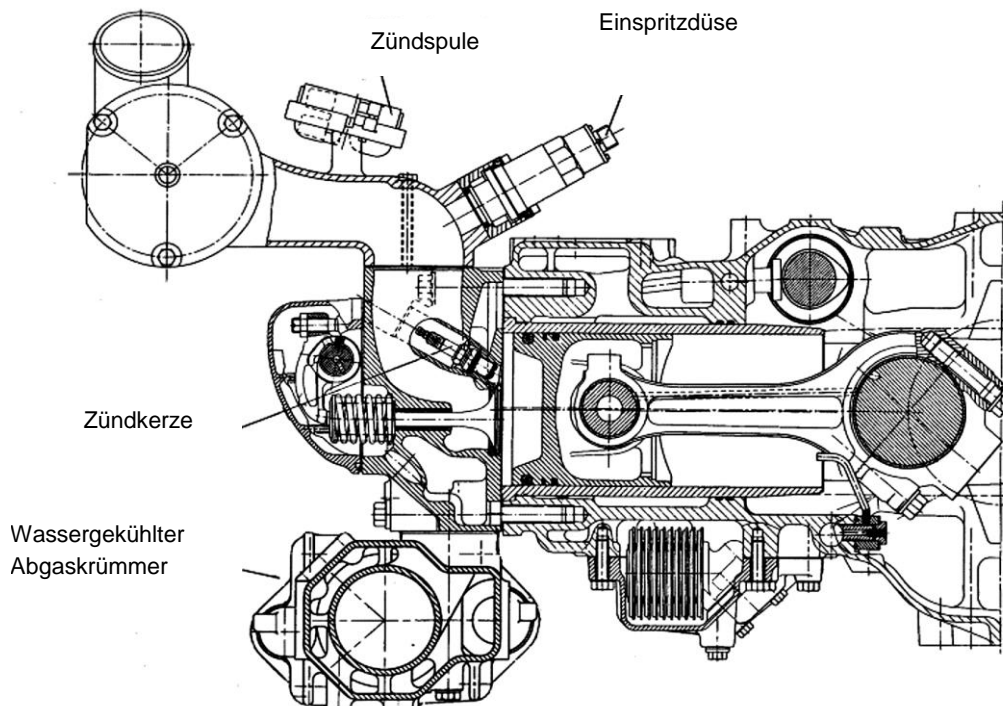


Abbildung 6: Schnitt Wasserstoffverbrennungsmotor H2876 UH01

In dem hier zum Abschluss gebrachten Projekt „Weiterbetrieb von vier Bussen mit Wasserstoffverbrennungsmotoren“ kam mit MANs H2876 UH ein Wasserstoffverbrennungsmotor zum Einsatz, der im Rahmen von HyFLEET:CUTE erfolgreich aus einem bereits bestehenden 140-kW-Wasserstoffverbrennungsmotor (H 2866 UH) weiterentwickelt worden war. Die Motorgeneration basierte auf der Erdgasmotoren-Baureihe E2866/76, die zum Zeitpunkt des Einbaus in die MAN-Busse weltweit bereits über 4.000 Mal verbaut worden war. Für den Einsatz als Wasserstoffverbrennungsmotor wurde der Erdgasmotor (6-Zylinder-Reihenmotor, 4-Takt-Ottomotor mit 12 l Hubraum, freisaugend) soweit modifiziert, dass jeder Zylinder über eine eigene Wasserstoffeinspritzanlage verfügt, die am Einlassstutzen angebracht und elektromagnetisch angesteuert wird. Die maximale Leistung des Motors liegt bei 150 kW und 2.200 U/min. Als Motorsteuerung wurde ein Bosch-Motronic-Steuergerät (Typ M 3.3) verbaut, welches über eine Kennfeldzündung mit ruhender Hochspannungsverteilung sowie Klopfregelung verfügt. Die Ansteuerung des Wasserstoff-Einblasventils erfolgt durch ein zusätzliches Steuergerät, das die von der Motronic empfangenen Informationen über Einblasbeginn und -dauer in Steuerbefehle für die Drehschieberventile umsetzt. Die Motorleistung schließlich wird über eine elektronisch angesteuerte und elektromotorisch angetriebene Drosselklappe geregelt. Diese drei Motorsteuergeräte kommunizieren über einen CAN-Datenbus miteinander.

Da eine Vielzahl von Komponenten wie z.B. das Motorgehäuse mit den regulär verbauten Komponenten identisch sind, konnten die Mehrkosten im Vergleich zur Erweiterung auf die Brennstoffzellentechnologie relativ niedrig gehalten werden. Der Brennraum wurde entsprechend den Anforderungen des Wasserstoffbetriebs ausgelegt und die Zuführung von Wasserstoff in den Ansaugtrakt durch elektronisch angesteuerte Einblasventile realisiert. Das verwendete Prinzip war die externe Gemischbildung mit Einblasventilen. Die in den Bussen eingesetzte Technologie verfügte über folgende Parameter:

<b>Antrieb</b>	Wasserstoffverbrennungsmotor	MAN Saugermotor H2876 UH01 mit 6 Zylindern
	Max. Leistung Max. Drehmoment	150 kW bei 2.200 u/min 760 Nm bei 1.000 u/min
	Automatisches Getriebe	Voith 854.4
	Wesentliche technische Eigenschaften	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Selbstansaugender Ottomotor</li> <li>• Lambda=1 Saugmotor</li> <li>• Externe Gemischbildung mit Einblasventilen</li> <li>• Leistungsregulierung über Drosselklappe</li> <li>• Abgasnachbehandlung mittels Katalysator</li> <li>• Elektromagnetische Einblasventile</li> <li>• Funkenzündung</li> <li>• Quantitative Leistungskontrolle</li> <li>• Wassergekühlter Abgaskrümmmer</li> <li>• Konventionelle Technologie, daher zu marktgängigen Kosten verfügbar</li> <li>• Niedriger Einblasdruck von 4 bar</li> </ul>

Abbildung 7: Darstellung der Leistungsparameter des MAN Saugermotor H 2876 UH 01

### A.1.3.3 Wissenschaftlicher und technischer Stand der Speichersysteme

Der bedeutendste Entwicklungsschwerpunkt der Druckspeicherung bestand in der Minimierung der zur Gewährleistung der Zylinderzyklenstabilität benötigten Kohlefasermenge, was nicht nur Kosten reduzierte, sondern auch die gravimetrische sowie volumetrische Speicherdichte durch reduziertes Zylindergewicht bzw. geringere Zylinderwandstärken erhöhte. Aufgrund der ca. 57 % höheren Dichte von flüssigem (70 kg/m<sup>3</sup>) im Vergleich zu komprimiertem Wasserstoff (40 kg/m<sup>3</sup> bei 700bar und 15°C) ließen sich in Flüssigspeichern zwar etwas höhere Speicherdichten erreichen. Nachteilig wirkten sich jedoch ein potentiell möglicher Vakuumbruch sowie die nach längerem Stillstand einsetzenden Abdampfverluste (Boil-off) aus, die nicht vermieden werden können. Fahrzeuge mit Flüssigwasserstofftank durften deshalb nicht in geschlossenen Räumen abgestellt werden. Hauptkostentreiber dieser Speichertechnologie war und ist der zeitaufwändige und komplexe Produktionsprozess. Eine Kombination aus Druck- und Flüssigspeicherung ist die sog. kryo-komprimierte Speicherung des Wasserstoffs in kombinierten hochvakuum-superisolierten, druckstabilen Komposit tanks bei -253°C und bis zu 350 bar. Aufgrund der doppelten Materialanforderungen (hoher Druck und niedrige Temperatur) ist diese Speicherlösung allerdings entsprechend kostenintensiv. Die Machbarkeit der Verwendung im Fahrzeug war bis dato nur unter idealisierten Bedingungen nachgewiesen. Erste Erprobungsfahrzeuge befinden werden derzeit von BMW zum Einsatz gebracht.

Bei Wasserstoff-Bussen ist der Wasserstofftank auf dem Dach platziert, weshalb ausreichend Platz existiert und daher anders als bei Pkw keine Notwendigkeit für höhere Speicherdichten besteht. Zur mobilen Speicherung von Wasserstoff wird deshalb die im Vergleich zur 750-bar-Speicherung günstigere 350-bar-Technologie verwendet, die zudem den Vorteil hat, dass auf eine energie- und kostenintensive Vorkühlung bei akzeptablen Betankungszeiten verzichtet werden kann. Die Tanks bestehen aus einem metallischen Innenbehälter, der die Dichtigkeit des Systems gewährleistet und von einem Netz aus Kohlefasern ummantelt ist, das für die notwendige Festigkeit des Systems sorgt (Typ-3-Tank). Der Vorteil gegenüber Voll-Kunststoff-Tanks (Typ-4-Tank) wird insbesondere bei der Speicherung von Wasserstoff unter hohem Druck deutlich: Der metallische Innenbehälter verhindert nicht nur die Permeation<sup>1</sup> des Wasserstoffs; da der Innenbehälter einen Teil der Last trägt, ist mit Typ-3-Tanks auch die höchste Speichereffizienz bei vorgegeben Bauvolumen erreichbar. Darüber hinaus sind Typ-3-Tanks in ihrer Baugröße flexibel und für die schnelle Betankung geeignet.

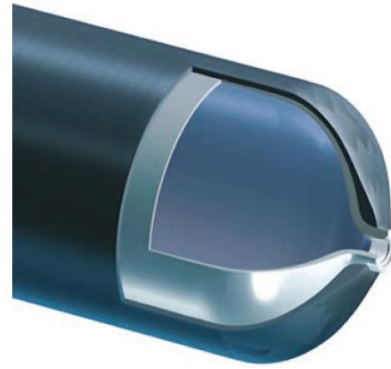


Abbildung 8: Typ-3-Tank

Der Kraftstoff bei den im Projekt verwendeten MAN Lion's City-H-Modellen wird als gasförmiger Wasserstoff bei einem Betriebsdruck von 350 bar in 10 aluminiumumwickelten Behältern gespeichert, die über ein Gesamtvolumen von 2050 l verfügen. Der Bus kann bis zu 220 km weit fahren und ist in der Lage eine Höchstgeschwindigkeit von 82 km/h zu erreichen.

<b>Wasserstoff-speicher</b>	Typ	Typ-3-Leichtbautank für CGH2
	System, Tankvolumen Druck	10-Flaschen-System, 10x205 l = 2050 l Max. 350 bar (unter Normalbedingungen)

Abbildung 9: Spezifikation der im H2-Bus verbauten Tanks

#### A.1.3.4 Wissenschaftlicher und technischer Stand der Standardisierung der Betankung

Der aktuelle Stand der Betankung von Wasserstoffbussen (sowohl von Brennstoffzellenbussen wie von Bussen mit Wasserstoffverbrennungsmotor) war zu Projektbeginn die 350-bar-Technologie. Technisch notwendig zur Busbetankung waren ausreichend große Speicher und/oder Kompressoren, um den gegebenenfalls erhöhten Bedarf zu decken und den Bus je nach Tankstellenkonzept aus den Speichern oder über Booster-Kompressoren zu betanken. In vielen Fällen bedeutete dies die Verwendung größerer Kompressoren und Mitteldruckspeicher als für eine reine Pkw-Tankstelle notwendig gewesen wären, wodurch für die Herstellung der Bustauglichkeit einer Tankstelle Mehrkosten entstanden. Zusätzlich wurde ein separater Dispenser mit entsprechender Füllkupplung sowie eine entsprechende Einfahrt benötigt. Zudem musste insbesondere ein hohes Maß an Verfügbarkeit sichergestellt werden, da Stadtbusse regelmäßig tanken und einen Teil der städtischen Transportinfrastruktur bereitstellen.

Bei den CEP-Tankstellen handelte es sich um Pilotanlagen, deren Zuverlässigkeit und Effektivität in einem iterativen Prozess ständig erhöht wurde. Damit eine Wasserstofftankstelle eine Freigabe für alle CEP-Kundenfahrzeuge erhielt, waren Abnahmetests notwendig, darunter auch die Abnahme von Tankstellen in Hinblick auf die Einhaltung definierter Befüllprotokolle. Im Gegensatz zu der

<sup>1</sup> Unter Permeation versteht man den Vorgang, bei dem ein Stoff (Permeat) einen Festkörper durchdringt oder durchwandert.



Betankung von Pkw gab es zu Projektbeginn für H<sub>2</sub>-Busse jedoch weder ein standardisiertes Befüllprotokoll noch einen einheitlichen Abnahmetest für die Wasserstofftankstellen, mit dem die Konformität des Betankungsvorgangs geprüft und nachgewiesen werden konnte. Die Tankstellen mussten dementsprechend bei Inbetriebnahme auf jeden Bustyp abgestimmt werden. Dies war zwar insofern unproblematisch als die H<sub>2</sub>-Busse fast ausschließlich als regional gebundene Stadtbusse im Einsatz waren, jedoch war diese Vorgehensweise mit einem enormen Aufwand verbunden, der durch einen vereinheitlichten Abnahmetest deutlich reduziert werden kann. Mit welchen technischen Spezifikationen die hierfür erforderlichen Druck- und Temperaturmessungen am besten erfolgen können, wird derzeit in der CEP noch erörtert. Auch im



*Abbildung 10: Dispenser zur Betankung mit 350 bar und 700 bar*

Normungsgremium der SAE gibt es die mittelfristige Absicht, das Betankungsprotokoll SAE J2601 über die Pkw hinaus auszuweiten und eine vereinheitlichte Betankungsprozedur für Busse einzuführen. Die Betankung selbst gestaltete sich wie folgt: Zu Beginn eines Betankungsvorganges ermittelt ein Teststoß die Dichtigkeit der Anlage, danach überströmt gasförmiger Wasserstoff, der im Wesentlichen Umgebungstemperatur aufweist, aus den Pufferspeichern zu dem zu betankenden Bus. Sobald ein Druckausgleich zwischen dem zu betankenden Fahrzeug und den Pufferspeichern erreicht ist, wird die Zufuhr von gasförmigem Wasserstoff beendet. Eine Infrarotkommunikation zwischen Tankstelle und Fahrzeug überwacht den gesamten Betankungsvorgang sowie die H<sub>2</sub>-Temperatur, um einer Überhitzung des Fahrzeugtanks vorzubeugen.

#### A.1.4 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Zur Betankung ihrer Busse arbeitete die BVG eng mit der TOTAL Deutschland GmbH zusammen, die an ihrer Tankstelle an der Heerstraße in Spandau den Bussen der BVG den Wasserstoff zur Verfügung stellte. Nach der Schließung der Tankstelle Heerstraße zum 31.12.2013 wurde die Kooperation mit Shell fortgeführt und die Betankung der Busse an der Tankstelle Sachsendamm vorgenommen. Die Reinigung der Busse und auch die Betankung übernahm in der ersten Projekthälfte die Firma Dr. Sasse Facility Management GmbH, mit der jedoch die Zusammenarbeit für das Jahr 2014 nicht fortgeführt wurde.

Auch wenn es mit der Linde AG keinen direkten Kooperationsvertrag gab, wurde im Zuge des Projekts ein enger und intensiver Austausch gepflegt, da Linde für die Wartung der Betankungsanlage im Auftrag von TOTAL zuständig war. Nachdem beispielsweise einmal die Busse mit Wasserstoff mit niedrigerer Qualität betankt wurden, stellte die BVG die Ventile für weitere Untersuchungen zu Verschleiß und Degression zur Verfügung.

Darüber hinaus wurden während des Projekts umfassende Betriebsdaten für das Wissens- und Informationsmanagement der CEP bereitgestellt. Diese Daten wurden in unterschiedlichen Aggregierungsstufen den Facharbeitsgruppen, dem Gesamtprojekt oder der Öffentlichkeit zugänglich gemacht. Seit Herbst 2010 war die BVG sogenannte „Phase-0-Partnerin“ ohne Anspruch auf Förderung im EU-geförderten Vorhaben CHIC und Mitglied der Hydrogen Bus Alliance. Im Rahmen dieser Vorhaben tauschte sie aktiv Daten, Informationen und Erkenntnisse mit Flottenbetreibern in anderen europäischen Städten (u.a. Amsterdam, Barcelona, London, Mailand oder Oslo) aus.

## A.2 Projektverlauf

Das Vorhaben wurde zum 01.02.2010 bewilligt und endete am 31.01.2015. Die Berliner Verkehrsbetriebe betrieben im Rahmen dieses Vorhabens über einen Zeitraum von fünf Jahren eine Flotte von vier bestehenden Bussen mit Wasserstoffverbrennungsmotoren weiter, die zum Ende der Projektlaufzeit eine Gesamtbetriebsdauer von 8,5 Jahren erreichten. Die Wasserstoffbusse hatten zusammen mit dem Vorgängerprojekt somit eine Betriebsdauer absolviert, die vergleichbar zu Dieselnissen am Ende ihrer Einsatzzeit innerhalb der BVG ist. Über den gesamten Projektzeitraum konnten die in den Arbeitspaketen geplanten Aktivitäten wie vorgesehen umgesetzt werden.

### A.2.1 Arbeitspaket 1: Busbetrieb

Im Rahmen dieses Arbeitspakets betrieb die BVG über einen Zeitraum von 60 Monaten vier Omnibusse mit 150 kW/204 PS-Wasserstoffverbrennungsmotoren weiter.

Fahrzeug	Amtliches Kennzeichen	Inbetriebnahme
Bus 1	B-V 1485	1.6.2006
Bus 2	B-V 1486	1.6.2006
Bus 3	B-V 1487	1.10.2006
Bus 4	B-V 1488	1.10.2006

Abbildung 11: Inbetriebnahme der Wasserstoffbusse

Da die Busse aufgrund ihrer geringen Reichweite nicht oder nur unter erschwerten Bedingungen auf allen Strecken eingesetzt werden konnten, war eine besondere logistische Betreuung der Fahrzeuge und die Planung ihres Einsatzes erforderlich, die durch das Personal der BVG erfolgte. Die H<sub>2</sub>-Busse wurden zumeist auf der Express-Linie X49 eingesetzt, die als eine von beiden Endstationen das prestigeträchtige ICC-Messegelände hat. Die Strecke ist über 10 km lang, eine Fahrt dauert durchschnittlich 25 Minuten und alle 1,73 km gibt es eine Haltestelle. Bei einer Durchschnittsgeschwindigkeit von 24,6 km/h verbrauchten die Busse etwa 20 kg Wasserstoff auf 100 km – was in etwa einem Verbrauch von 43 l bei vergleichbaren Dieselnissen entspricht – und fuhren im Fahrbetrieb praktisch emissionsfrei.



Abbildung 12: Streckenführung X49

Die Fahrer wurden für den Betrieb der Wasserstoffbusse hinsichtlich der Technologie und ihrer Prozeduren im Falle von Störungen extra geschult. Gerade bei den Fahrern zeigte sich, dass der Umgang mit Wasserstoff als Treibstoff zwar insgesamt gefahrlos, jedoch mit einigen Neuerungen verbunden ist, die die Alltagsroutinen der Fahrer irritierten. Beispielsweise muss der Zündschlüssel bis zur Abgabe des Zündfunken länger als bei Benzin- oder Dieselnissen gehalten werden. Ist dieses Zeitfenster zu kurz, dann wird zwar das Wasserstoff-Sauerstoff-Gemisch gebildet, jedoch nicht entzündet. Geschieht dies mehrmals, dann bildet sich eine größere Menge Knallgas, die dann bei der Entzündung schließlich explodiert. Dies ist für die Fahrer zwar nicht gefährlich, jedoch führte es zu einer gewissen Skepsis gegenüber den Wasserstoffbussen gerade bei ungeschulten Fahrern, die als Ersatz für die Spezialfahrer etwa in Krankheits- und Urlaubszeiten zum Einsatz kamen. Für den

Betrieb der Busse wurde daher im Wesentlichen darauf geachtet, nur auf den Wasserstoffbussen geschulte Fahrer einzusetzen. War dies nicht möglich, führte dies bisweilen zu verringerten Laufleistungen.

Der Einsatz der Wasserstoffbusse erfolgte vor allem im Frühdienst zur Abdeckung der Frühspitzen und im Nachmittagsdienst. Sie übernahmen damit reguläre Aufgaben des Liniendienstes, die sonst von Dieselbussen hätten erfüllt werden müssen. Nach dem Frühdienst wurde die Betankung der Busse von TOTAL-Mitarbeitern vorgenommen, nach dem Spätdienst geschah dies durch die Firma Dr. Sasse Facility Management GmbH, die auch für die Reinigung der Busse zuständig war. Ab dem Jahr 2014 wurde der Aufgabenbereich der Firma Sasse aus unternehmerischen Gründen von den Mitarbeitern der BVG selbst übernommen.

Ab dem Jahr 2012 kam es zu ersten relevanten Problemen mit dem Antriebsstrang, die insbesondere deswegen als gravierend einzustufen waren, weil der **Fahrzeughersteller benötigte Ersatzteile nicht mehr liefern konnte**. Zwar konnte durch einen **umfassenden Know-how-Aufbau bei der BVG** – im Rahmen des Vorläuferprojekts waren die Fahrzeuge vom Hersteller gewartet worden – die Effizienz im Umgang mit der Wasserstofftechnologie wesentlich erhöht und über den gesamten Zeitraum die Betriebsbereitschaft der Wasserstoffbusflotte sichergestellt werden, jedoch konnten die hohen Fahrleistungen der ersten Monate des Projekts für die restliche Laufzeit nicht mehr erreicht werden. Zusätzliche Belastungen traten zudem durch die turnusmäßig fällige Überprüfung der Speichersysteme auf: Im ersten Halbjahr 2012 kam es etwa zur Überprüfung der Zylinder an einem Fahrzeug. Da diese vom ausführenden Dienstleister allerdings nur mit sehr großer Verzögerung durchgeführt wurde, war das Fahrzeug während dieses Zeitraums weitgehend außer Betrieb gestellt. Gegen Ende desselben Jahres wurde die turnusmäßige Überprüfung der Gasanlage an einem weiteren Fahrzeug erforderlich, die Anlage wurde demontiert und an den Hersteller Dynatek übersandt, der die Überprüfung durchführte.



*Abbildung 13: Werkstatt für die Wasserstoffbusse auf dem Gelände der BVG Heerstraße*

Die verminderte Fahrleistung der Flotte im 1. Halbjahr 2014 (vgl. Abbildung 14), hatte ihre Ursachen einerseits im altersbedingten Verschleiß der Kühler: Im Februar 2014 wurde der Kühler zunächst beim Fahrzeug B-V 1488 erneuert, im Mai 2014 erfolgte dann die Überarbeitung an den übrigen drei Busse, so dass diese in diesen Zeiträumen nicht für den Linienverkehr eingesetzt werden konnten. Andererseits wurde im selben Zeitraum mit den Sanierungsarbeiten der Spandauer Freybrücke

begonnen, so dass – insbesondere im August 2014 – nur ein verminderter Busverkehr auf der Linie möglich war.

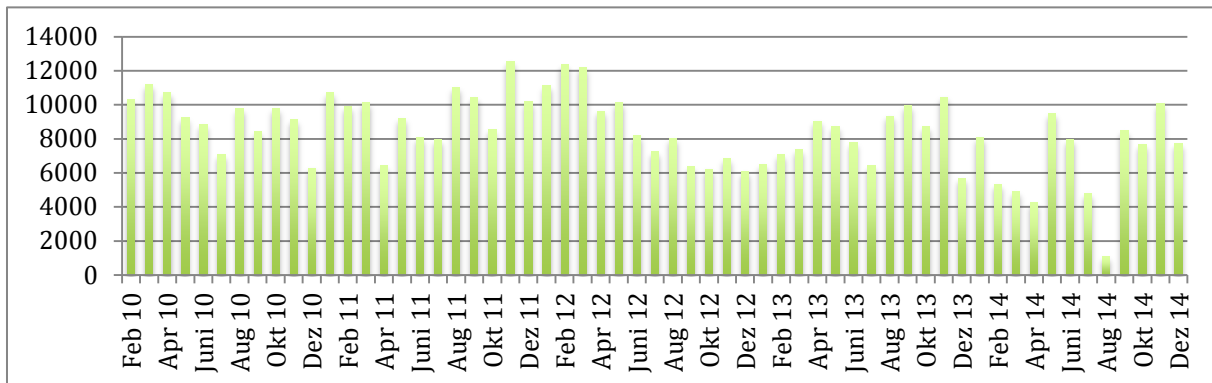


Abbildung 14: Fahrleistung der Flotte in km

Dass darüber hinaus die gesamte Fahrleistung im Jahr 2014 im Vergleich zu den vorangegangenen Jahren zurückging, hatte nicht zuletzt mit der Schließung der Tankstelle an der Heerstraße am 31.12.2013 zu tun, an der die Fahrzeuge bis dato betankt worden waren. Hintergrund für die Schließung war die geplante Eröffnung der TOTAL-Tankstelle am Flughafen Berlin-Brandenburg International (BER). Hier hätten auch die Busse der BVG zum Einsatz kommen sollen. Die Umsetzung dieses Vorhabens scheiterte an der wiederholten Verschiebung der Eröffnung des Flughafens.

Die Schließung des Standorts Heerstraße erhöhte den Aufwand für die Betankungslogistik erheblich, da die Betankung der Busse ab 01.01.2014 an der Shell-Tankstelle am Sachsendamm in Berlin Schöneberg erfolgen musste und somit zwischen dem Betriebshof der BVG und der Betankungsanlage statt 450 m nunmehr 16 km zurück gelegt werden mussten. Eine mögliche Verlegung der Busse auf einen anderen Betriebshof war aufgrund der ausschließlichen Verfügbarkeit der Wartungs- und Servicekapazitäten für Wasserstoffbusse auf dem Betriebshof Spandau nicht möglich. Als alternativer Betankungsstandort wäre die Wasserstofftankstelle Heerstraße/Jafféstraße möglich gewesen, da sich diese auf der Strecke des X49 befindet, jedoch war bei der Planung der Tankstelle auf eine Betankungsmöglichkeit für Busse verzichtet worden – zumal das Gelände auch für Busbetankungen nicht geeignet ist.

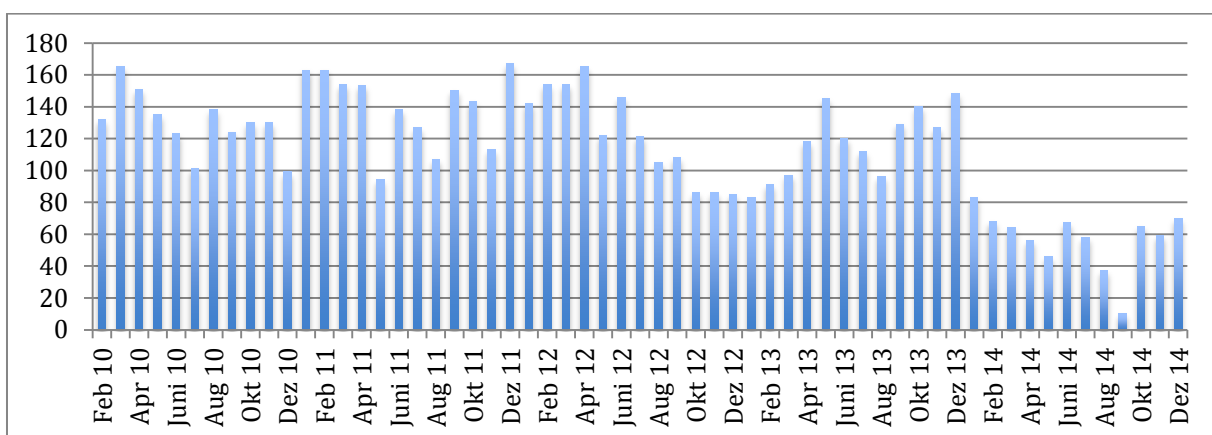


Abbildung 15: Anzahl der Betankungen

Die Tankstelle Sachsendamm wurde seit Jahresbeginn 2014 täglich vom Depot Spandau aus zu Betankungszwecken angefahren. Die niedrigere Anzahl der Betankungen im Vergleich zu den Vorjahren erklärt sich daraus, dass im Zuge des Standortwechsels nicht mehr zweimal täglich getankt und dementsprechend mehr Wasserstoff betankt wurde. Für den Betreiber Shell war die Versorgung



der BVG-Wasserstoffbusse insofern von Vorteil, als erstmals in der Geschichte des Standorts die Forschungstankstelle Sachsendamm (Förderkennzeichen 03BV104) durch die Busbetankungen hohe Abgabemengen erreichte und eine ausreichende Last gefahren werden konnte. Die kontinuierlich hohen Auslastungswerte ermöglichten es so erstmals, die Leistungsfähigkeit der Anlagenkomponenten unter praxisnahen Bedingungen umfassend zu evaluieren. Insofern war der Wechsel des Tankstellenstandorts für das hier abgeschlossene Projekt hinsichtlich der Logistik zwar sehr herausfordernd, jedoch konnte auf diesem Weg das Ziel des Projekts, bestehende Infrastrukturen durch hohe Abnahmemengen besser auszulasten, auch an einem weiteren Standort in Berlin verwirklicht werden.

Beim Verhältnis von betanktem Wasserstoff zu gefahrenen Kilometern ist die Diskrepanz in der Höhe der Verbräuche auffallend (vgl. Abbildung 16) – zum einen im Jahr 2011 und zum anderen im Jahr 2014. Diese hatte ihre Ursache in einer fehlerhaften Kalibrierung des Mengenmessers. Das Fehlen eines eichfähigen Betankungssystems, über dessen technische Ausrichtung innerhalb der CEP ausführlich beraten wird, trat hier besonders deutlich zutage: Da die Mengenmessung nicht eichfähig ist, wird sie über das ungenaue Messsystem des Busses kalibriert. In den Bussen wiederum sind Messsysteme der Pkw verbaut, die jedoch nur für Tankkapazität 4 kg ausgelegt sind. Da die Busse wiederum über eine Kapazität von 38 kg verfügen, müssen bei der Betankung Ungenauigkeiten in Kauf genommen werden. Der BVG gelang es nach Anfangsschwierigkeiten, dieses Messsystem in Zusammenarbeit mit TOTAL soweit zu optimieren, dass im Laufe des Projekts die Mengenmessung der tatsächlichen Betankungsmenge angeglichen werden konnte. Im Zuge der Betankung bei Shell schlug das Pendel in die andere Richtung aus und konnte auch nicht mehr angeglichen werden. Es ist also nicht so wie es die Daten nahe legen, dass die Busse im ersten Jahr besonders viel verbraucht hätten, um zum Ende der Projektlaufzeit wesentlich sparsamer zu sein.

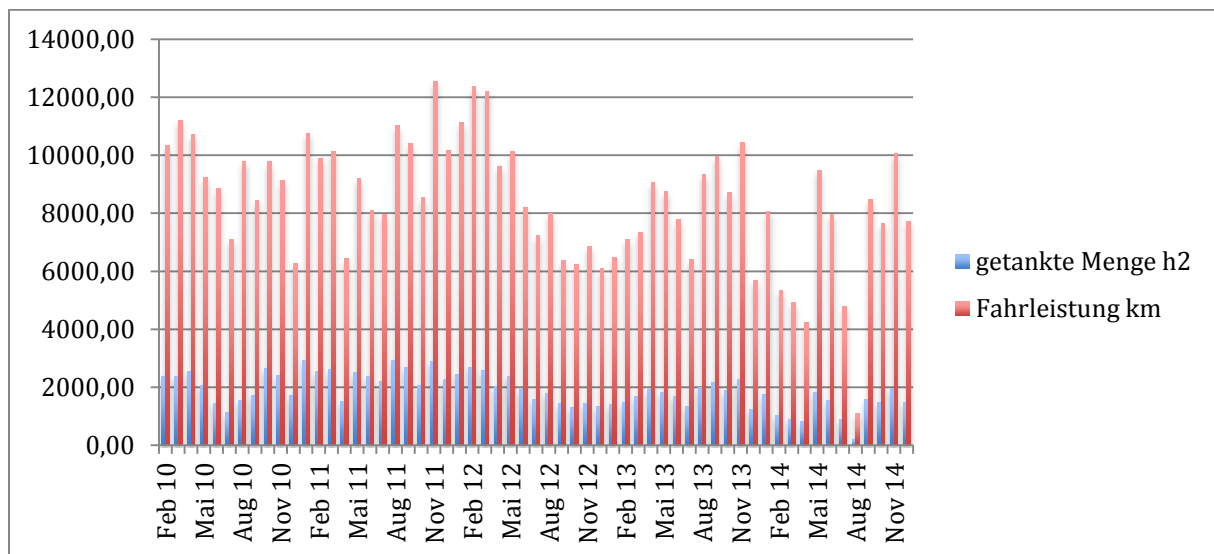


Abbildung 16: Verhältnis der getankten Menge H<sub>2</sub> zur Fahrleistung

Zum Aufgabenumfang im Rahmen des Arbeitspakets gehörten neben der Bereitstellung der Fahrzeuge für den Linienbetrieb auch die Zurverfügungstellung der Wasserstoffbusse für Veranstaltungen, VIP- und Sonderfahrten sowie die Koordinierung weiterer öffentlichkeitswirksamer Maßnahmen. Die Integration der Fahrzeuge in die Kommunikationsaktivitäten der CEP ermöglichte aber nicht nur die Präsentation der Wasserstoff-Busse; durch die Teilnahme an Fahrveranstaltungen im Zusammenhang mit der CEP-Außendarstellung konnten darüber hinaus auch weitere wertvolle Erfahrungen im Bereich der öffentlichen Wahrnehmung und Nutzerakzeptanz der Busse über den täglichen Busbetrieb in Berlin hinaus gesammelt werden: Die BVG nahm etwa an der von der CEP veranstalteten „Saubersten Rallye aller Zeiten“ am 12. Mai 2010 und im Jahr 2011 an der vom Reifenhersteller Michelin ins Leben gerufenen „Challenge Bibendum“ in Berlin teil, die der Präsentation von technischen Lösungen und Konzepten für eine nachhaltige Mobilität im

Straßenverkehr dienen. Ziel der Veranstaltungen war es, Fahrzeugentwicklungen vorzustellen, die darauf ausgelegt sind, den Energieverbrauch zu senken, den CO<sub>2</sub>-Ausstoß zu minimieren, die Energieversorgung für den Straßenverkehr zu sichern, die Lärmbelastigung zu reduzieren, die Unfallzahlen zu vermindern oder den Verkehrsfluss zu verbessern. Hier konnten die Wasserstoffbusse ihre Praxistauglichkeit und Leistungsfähigkeit gegenüber einer interessierten Öffentlichkeit unter Nachweis stellen. Weitere besondere Termine waren



*Abbildung 17: Ein Techniker zeigt Schülern den Motorraum eines Wasserstoffbusses*

die Teilnahme am Sommerfest der Gustav-Heinemann-Oberschule im Jahr 2012, bei dem Schüler der Chemie- und Physikleistungskurse den Gästen die Funktionsweise des Wasserstoffbusses erklärten, sowie die Teilnahme an der Workshop-Reihe „Energiewende in Deutschland – ein Modell für Europa?“ der Deutschen Gesellschaft e.V., bei der Schüler aus ganz Deutschland anhand der Wasserstoffbusse der BVG über die Energiewende diskutierten.



*Abbildung 18: Teilnahme an der „Challenge Bibendum“*

Folgende Inhalte wurden im Rahmen des Arbeitspakets realisiert:

- Betrieb der Wasserstoffbusflotte im Berliner Linienverkehr
  - Betrieb auf vorgegebenen Routen mit professionalisierten und speziell für diese Aufgabe geschulten Fahrern
  - Dauertest der Fahrzeuge unter realen Alltagsbedingungen
- Sammlung und datenseitige Erfassung von Betriebserfahrungen mit den Brennstoffzellenfahrzeugen unter realen Einsatzbedingungen

- Forschungsbetrieb von 4 Wasserstoffbussen
- Dauertests der Fahrzeuge unter realen Alltagsbedingungen
- Generierung von Fahr-, Verbrauchs- und Betankungsdaten
- Bereitstellung ausgewählter Daten für die zentrale CEP-Datensammlung und -auswertung
- Präsentationen der H<sub>2</sub>-Busse bei Fahrveranstaltungen im Zusammenhang mit der CEP-Außendarstellung und Unterstützung bei PR-Events: Challenge Bibendum 2011, Hannover Messe, Workshop-Reihe „Energiewende in Deutschland – ein Modell für Europa?“ der Deutschen Gesellschaft e.V., „Sauberste Rallye aller Zeiten“, Sommerfest der Gustav-Heinemann-Oberschule

### A.2.2 Arbeitspaket 2: Fahrzeugwartung

Da der Fahrzeughersteller MAN ab Projektbeginn für eine Betreuung der Fahrzeuge nicht mehr zur Verfügung stand, übernahm die BVG ab 01.02.2010 die Wartung und Reparatur der Fahrzeuge in der bereits existierenden und von der BVG betriebenen Werkstatt für Wasserstoffbusse selbst. Die BVG setzte über die gesamte Projektlaufzeit fünf Techniker in Vollzeit für die Betreuung der Fahrzeuge ein. Zum Leistungsumfang der Techniker gehörten die normale turnusmäßige Überprüfung und Wartung der Fahrzeuge, außerplanmäßige Reparaturen der Fahrzeuge inklusive der Arbeiten am Wasserstoffantriebsstrang und das allgemeine Werkstattmanagement. Im Rahmen dieses Arbeitspakets wurden die Techniker fachspezifisch geschult, um den ordnungsgemäßen Betrieb wie auch die Durchführung der täglich notwendig werdenden Fahrzeugwartungen erfolgreich durchführen zu können. Darüber hinaus waren sie für die Druckprüfung der Speicherzylinder zuständig. Ein Austausch der Einblasventile erfolgte alle 10.000-15.000 km direkt durch den Hersteller Hoerbiger. Ersatzteile und Verbrauchsstoffe sowie erforderliche Ersatzteile – insbesondere Spezialöle für den Antriebsstrang – wurden beschafft.



Abbildung 19: Werkstattplatz mit Eignung für 18-m-Gelenkbusse

Durch das speziell geschulte Personal beim Dienstleister Dr. Sasse Facility Management GmbH konnten die Fahrzeuge einem täglichen Service unterzogen werden, der neben der Reinigung der Fahrzeuge ausdrücklich auch die Betankung umfasste – diese durfte aufgrund arbeitsrechtlicher

Bedingungen nicht von den Fahrern selbst vorgenommen werden. Die durch die Tankgröße vorgegebene Reichweite der Fahrzeuge von ca. 200-250 km ermöglichte eine intensive Betreuung der Wasserstoffbusse.

Durch den Knowhow-Aufbau bei der BVG war es möglich, sämtliche Wartungs- und Reparaturarbeiten an den Wasserstoffbussen zu übernehmen. Dies hatte nicht nur den finanziellen Vorteil, dass kein Expertenwissen extern eingekauft werden musste, darüber hinaus konnte hierüber eine hohe Betriebssicherheit sichergestellt werden. Die am Standort durchgeführten Wartungsarbeiten unterschieden sich in Arbeiten am Gassystem und sonstige Arbeiten. Bei den Wartungsarbeiten wurden keine Vorkehrungen getroffen, da mit gasförmigem Wasserstoff betriebene Omnibusse als betriebsmäßig dichtes System gelten. Für den Havariefall verfügt die Gebäudetechnik der Werkstatt über eine Wasserstoffsensoren, die bei erhöhter Wasserstoffkonzentration (80 Prozent unter Explosionsschwellenwert) die Luftwechselrate auf den fünffachen Faktor je Stunde anhebt, womit dem Entstehen einer explosionsfähigen Atmosphäre entgegengewirkt wird. Die Werkstatthalle wurde kontinuierlich, auch zu Nachtzeiten, durch eine Be- und Entlüftungsanlage einer natürlichen dreifachen Luftwechselrate je Stunde unterzogen. Insbesondere bei Schweißarbeiten wurde das Gassystem zusätzlich inertisiert, d.h. die Anlage wurde von Wasserstoff entleert und mit Stickstoff gespült.

Einmal jährlich wurden die Busse einer Hauptuntersuchung unterzogen. In diesem Zusammenhang wurden sowohl die Zündkerzen gewechselt als auch der Schadstoffausstoß untersucht. Bei allen Untersuchungen unterschritt der Wasserstoffverbrennungsmotor H 2876 UH 01 im Zusammenspiel mit einem verbauten 3-Wege-Katalysator alle festgelegten EU-Abgasgrenzwerte erheblich. So lagen die Stickoxide (NOx) bei rund 0,2 g/kWh (Euro 5: 2,00), die Kohlenwasserstoffe (HC) bei 0,04 g/kWh (0,46) und die Partikelmasse (PM) unter 0,005 g/kWh (0,02). Kohlenmonoxidemissionen liegen unter der Nachweisgrenze (alle Werte nach ESC, dem European Stationary Cycle).

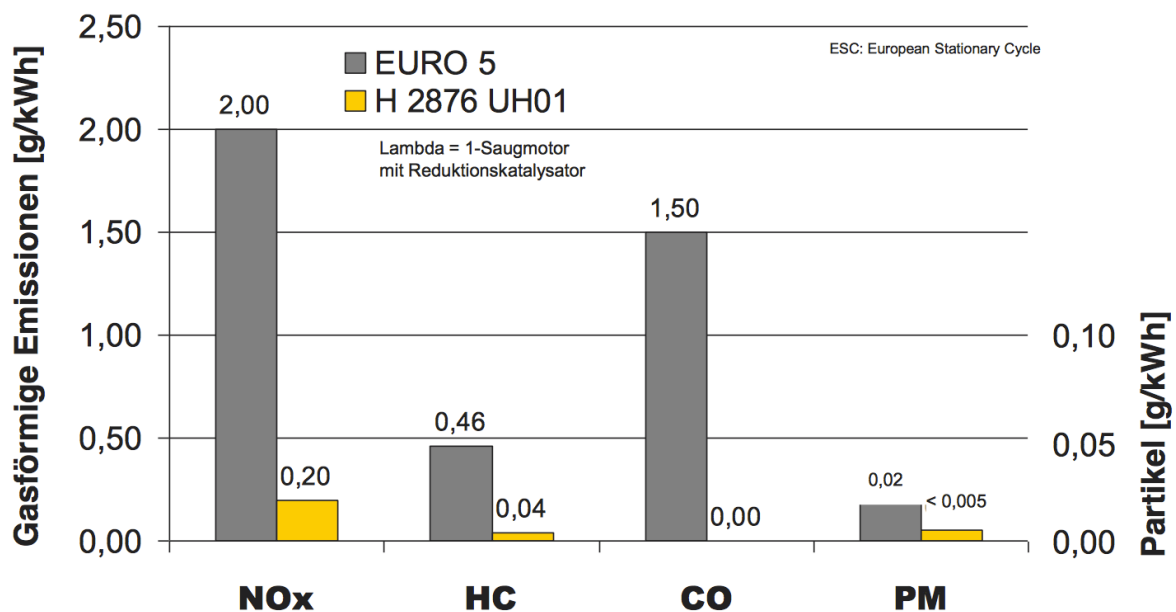


Abbildung 20: Abgasemissionen im ESC des Wasserstoffverbrennungsmotors H2876 UH01

Folgende Inhalte wurden im Rahmen des Arbeitspakets realisiert:

- Durchführen von Diagnostik- und Wartungsarbeiten
- Datenauslesungen und Einsatz von Diagnosesystemen
- Definition von Maßnahmen zur Steigerung der Zuverlässigkeit
  - Fahrzeugservice und Reduktion der Fahrzeugausfallzeiten



- Durchführung von Reparaturen
- Maßnahmenverfolgung im Hinblick auf ihre Wirksamkeit
- Definition von Verbesserungen
  - Fehlermanagement
- Servicearbeiten, Routinekontrollen und Funktionschecks
- Optimierung von Betriebs- und Sicherheitskonzepten
- Bereitstellung von Verbrauchsmaterialien und Ersatzteilen
- Qualifizierung von Servicemitarbeitern und Fahrern

### A.2.3 Arbeitspaket 3: Werkstattbetrieb

Zur Instandsetzung der Busse diente eine speziell für die Wasserstoffbusse konzipierte und errichtete Werkstatt auf dem Betriebshof Heerstraße, die sich in unmittelbarer Nachbarschaft zu den Wasserstoffbetankungseinrichtungen befindet. Der Aufbau der Anlage war bereits vor Projektbeginn mit Inbetriebnahme der Anlage im September 2007 endgültig abgeschlossen worden. Die Ausstattung der Werkstatt erlaubt sowohl die Betreuung von Wasserstoff- wie auch von Hybrid- und Hochvolt-Elektrofahrzeugen.



Abbildung 21: Wasserstoffbuswerkstatt an der Heerstraße

Das zweistöckige Gebäude verfügt über zwei Serviceplätze von denen einer für 12-m-Standardbusse, der andere auch für Gelenkbusse bis 18 m ausgelegt ist. Beim größeren der beiden Plätze ist eine Ein- und Ausfahrt eingebaut, so dass der Platz von beiden Gebäudefronten her angefahren werden kann. Das Gebäude ist explizit für Arbeiten auf dem Fahrzeugdach ausgelegt. Die notwendige Sicherheitsausstattung für Arbeiten oberhalb von 3 m ist installiert. Neben jedem Fahrzeug ist ein 1,8 m tiefer Arbeitsbereich bereitgehalten, der auch den Ausbau elektrischer Radnabenmotoren erlaubt. Weitere Werkstatt- und Lagerräume befinden sich im Erdgeschoss verteilt auf einer Gesamtfläche von 204,75 m<sup>2</sup>. Hinweis-, Verbots- und Gefahrenschilder weisen das Werkstattpersonal im Bereich der allgemeinen Anlagentechnik auf die einschlägigen Gefahren im Umgang mit brennbaren Gasen hin. Die Büroräume für das Betreuungsteam und ein Besprechungsraum sind im Obergeschoss auf 186 m<sup>2</sup> untergebracht.

Folgende Inhalte wurden im Rahmen des Arbeitspakets realisiert:

- Betrieb der Servicestation Heerstraße und Sicherstellung der Betriebsbereitschaft der Wasserstoffbusse
  - Strom, Wasser, Abwasser, Heizung, Reinigung, Telekommunikation
- Beschaffung spezifische Betriebsmittel: Technische Gase, insb. Wasserstoff und Stickstoff
- Wartung und regelmäßige Prüfung der technischen Einrichtungen, d.h. insbesondere der Sensorik und der Belüftungstechnik.
- Anpassung von Wartungs- und Servicekonzepten an die Betriebserfahrungen
- Implementierung eines Fehlermanagements
- Schulungen von Fahrern und Servicepersonal im Hinblick auf die Forschungsziele
  - Fahrsicherheitstraining gemäß hausinterner Regelung
  - Aufklärung über Eigenschaften von Wasserstoff
  - Aufklärung über die Speicherung von Wasserstoff im Fahrzeug
  - Einführung in die Technik wasserstoffbetriebener Elektrofahrzeuge
  - Einweisung in den Betankungsprozess (vor Ort)
  - Fahrzeugeinweisung
  - Sicherheitsbelehrung
  - Verhalten im Notfall

#### A.2.4 Arbeitspaket 4: Datenanalyse und Auswertung der Betriebsergebnisse

Die gesamte Wasserstoffbusflotte unterlag einem kontinuierlichen Beobachtungs- und Analyseprozess. Ein Koordinator trug Sorge, dass der Fahrbetrieb der Flotte nicht mehr als nötig beeinträchtigt wurde. Der Betrieb der Wasserstoffbusse in Eigenregie ermöglichte es, dass die geschulten Mitarbeiter die Betankungsvorgänge gezielt überwachen und so neue Erkenntnisse über den Betankungsvorgang sammeln konnten. Die Erhebung umfassender Fahrzeugdaten erlaubte zudem die Analyse des Betriebs- und Alterungsverhaltens einzelner Komponenten, was für die BVG zur Einschätzung zukünftiger Wasserstoffaktivitäten von maßgeblicher Bedeutung war.

Diese Erkenntnisse flossen sowohl in die CEP-Gremienarbeit wie auch in die Datenbanken des CHIC-Projekts ein: Im Zusammenhang mit der Mitarbeit der BVG im HyFLEET:CUTE-Nachfolge-Projekt „Clean Hydrogen in European Cities (CHIC)“, welches im Rahmen der „Joint Technology Initiative (JTI)“ der EU realisiert wurde, tauschte die BVG mit anderen europäischen Städten umfassende Erfahrungen und Betriebsdaten über den Einsatz von wasserstoffgetriebenen Nahverkehrsbussen aus. Ein intensiver Austausch erfolgte auch innerhalb der CEP, der die BVG die Betriebsdaten zur Verfügung stellte. Diese fanden Eingang in die zentralen CEP-Datenbanken und standen somit für eine gemeinsame wissenschaftliche Auswertung zur Verfügung. Über den Abgleich mit den durch die CEP-Infrastrukturpartner erhobenen Daten lieferte die BVG so einen wertvollen Input für die CEP-Gremien, der u.a. eine Validierung des Betankungsprozesses und der aktuell eingesetzten ungeeichten Mengenmesstechnologie erlaubte.

Sämtliche relevanten Betriebsdaten der Busse – wie Druckfüllmengen, Wasserstoffverbrauch oder die Ermittlung der Betriebskosten – wurden im Rahmen der CEP konsequent gesammelt, eingehenden Plausibilitätschecks unterzogen und in das Informations- und Wissensmanagementsystem der CEP eingespeist und ausgewertet. Die BVG konnte auf diesem Wege detaillierten Analysen der Fahrzeugeffizienz auch im Vergleich zu anderen Antriebsformen vornehmen. Besonderes Augenmerk wurde dabei auf die Fahrzeugperformance über den gesamten

Lebenszyklus gerichtet, und wesentliche Erkenntnisse hinsichtlich der Alterungsbeständigkeit und Standfestigkeit der Technologie im Vergleich zu konventionellen Antriebstechnologien wurden gesammelt.

Folgende Inhalte wurden im Rahmen des Arbeitspakets realisiert:

- Definition und Erhebung von Messdaten
- Entwicklung und Optimierung eines Datenmanagements
- Erhebung von Umfelddaten und Datenfusion zur Beurteilung weiterer Einflussgrößen auf die Robustheit von Fahrzeugkomponenten (z.B. H<sub>2</sub>-Qualität, Schadstoffdaten etc.)
- Auswertung und Interpretation der statistischen Daten
- Analyse von Betriebsdaten zur Erforschung von Strategien zum möglichst wirtschaftlichen Fahrzeugbetrieb
- Analyse von Betankungsvorgängen
- Analyse von Auffälligkeiten beim Fahrzeugbetrieb
- Bereitstellung ausgewählter Daten für die zentrale CEP-Datensammlung und -auswertung
- Fortführung des Transfers von Flottenerfahrungen in die CEP zur weiteren Optimierung der Fahrzeug-/Infrastrukturinteraktion
- Einspeisung von erlangtem Wissen in die relevanten CEP-Gremien (AKs Wasserstoffqualität, Füllkupplungstest, Füllprozess, Mengemessung, H<sub>2</sub>-Backup, AGMI, AGMP u.a.)

#### A.2.5 Arbeitspaket 5: Koordinierung und Management

Die Realisierung dieses Arbeitspakets erfolgte durch die BVG. Während wesentliche Teile der Koordinierung des Gesamtvorhabens CEP in dessen sogenanntem „Übergeordneten Modul“ gebündelt waren, hatte auch jedes Projektmodul in begrenztem Umfang dem Übergeordneten Modul zuzuarbeiten. Leistungen im Rahmen dieses Arbeitspakets umfassten damit vor allem:

- die technische Koordinierung insbesondere mit den Unterauftragnehmern im Rahmen des Projektmoduls
- die Lieferung von Daten und Informationen für das Berichtswesen der CEP (die Aufbereitung der Informationen erfolgt im Rahmen des „Übergeordneten Moduls“)
- Koordinierung mit den CEP-Projektgremien
- die Koordinierung des Vorhabens mit dem Fördermittelgeber und seinem Projektträger

## A.3 Projektevaluation

### A.3.1 Verwendung der Zuwendung

Unter Verwendung der Zuwendung erfolgten im Rahmen dieses Vorhabens der Betrieb und die Erforschung von vier Omnibussen mit Wasserstoffverbrennungsmotoren. Neben den Betriebskosten kamen im Rahmen dieses Vorhabens Personalkosten des Förderempfängers, die in unmittelbarem Zusammenhang mit der Umsetzung des Vorhabens standen, sowie Kosten für die Reparatur der Forschungsfahrzeuge zum Ansatz. Im Zuge des Projekts wurden nicht die kompletten Kraftstoffkosten gefördert, sondern lediglich die Mehrkosten zum Verbrauch vergleichbarer Dieselfahrzeuge. Die BVG folgte hiermit der Praxis, wie sie bereits im Projekt HyFLEET:CUTE erfolgreich umgesetzt worden war. Die Mehrkosten im Vergleich zum Diesel wurden mit 0,99 EUR pro gefahrenen Kilometer veranschlagt und in der nachfolgenden Tabelle ins Verhältnis gesetzt:

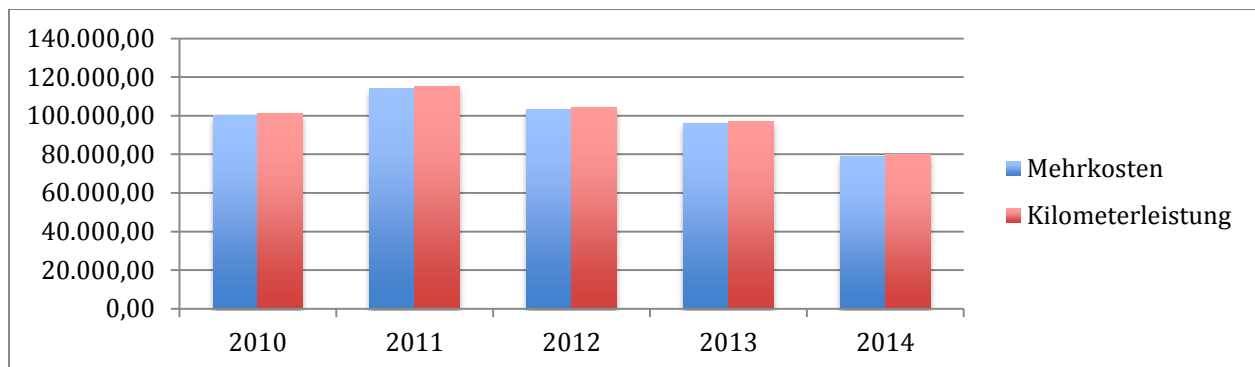


Abbildung 22: Verhältnis der Mehrkosten in EUR über die Projektlaufzeit

Die im Rahmen des Förderantrags formulierten Projektziele waren zum Projektende umfassend erreicht. Die verwendeten Fördermittel wurden antragsgemäß wie folgt zur Erreichung der Projektziele eingesetzt:

- Betrieb einer Forschungsflotte von vier Wasserstoffbussen,
- Sammlung und datenseitige Erfassung von Betriebserfahrungen mit den Wasserstoffbussen unter den Einsatzbedingungen des Liniendienstes,
- Demonstration der Fahrzeuge im Alltagsbetrieb,
- Betreuung und Koordination, Bereitstellung und Sicherung der Fahrzeugverfügbarkeit, Evaluation des Fahrzeugbetriebs,
- Unterstützung der CEP-Außenkommunikation,
- Qualifizierung von Servicemitarbeitern für Wartungs- und Instandsetzungsarbeiten.

### A.3.2 Ergebnisse und Zielerreichung

Alle wesentlichen Projektziele konnten im Rahmen des Vorhabens vollständig erreicht werden. Ziel des Forschungsvorhabens war es, über die Weiterführung des Flottenbetriebs von vier Wasserstoffbussen die Alterungsbeständigkeit und die Standzeiten einzelner Bauteile konkret zu determinieren sowie entsprechende Daten konsequent zu erfassen, auszuwerten und zur Verfügung zu stellen.

Ein zentraler Arbeitsschwerpunkt lag dementsprechend in der Untersuchung des **Alterungsverhaltens und der Zuverlässigkeit** der Komponenten des Systems. Daneben sollte das Vorhaben wesentlich zur **Entwicklung von Verfahren und Standards in den Bereichen Wartung** von Wasserstoffbussen und Werkstattbetrieb unter besonderer Berücksichtigung von Wasserstoff als Kraftstoff beitragen. Zu Beginn des Vorhabens hatte die BVG eine Reihe wissenschaftlicher und



technischer Arbeitsziele formuliert, die es durch Realisierung dieses Fördervorhabens zu erreichen galt:

**1. Nachweis einer hohen, dem Diesel-Antriebsstrang vergleichbaren Langzeitstandfestigkeiten der eingesetzten Technologien:** Über einen Zeitraum von fünf Jahren wurde ein Dauerbelastungstest für die Wasserstoffantriebstechnologie im Alltagseinsatz eines Omnibus-Linienverkehrs durchgeführt, die der üblichen Einsatzdauer konventioneller Antriebstechnologien in der Flotte eines ÖPNV-Anbieters entsprach. Das Projekt machte sich hierbei unmittelbar die im Rahmen von HyFLEET:CUTE erbrachten Vorleistungen zunutze und baute auf diesen auf. Zusammen mit der Betriebszeit im Vorgängerprojekt verfügten die Busse zu Projektende bei ihrem Einsatz im Linienverkehr insgesamt über eine 8,5-jährige Verweildauer im Flottenbestand der BVG, was länger als die durchschnittliche Verweildauer von Dieselnissen innerhalb der BVG-Flotte ist. Wenngleich sich insbesondere zum Ende der Betriebsdauer Probleme am Antriebsstrang häuften und nur noch auf einen geringen Ersatzteilbestand zurückgegriffen werden konnte, konnten die Techniker der BVG den Betrieb über die Projektlaufzeit erfolgreich aufrechterhalten.

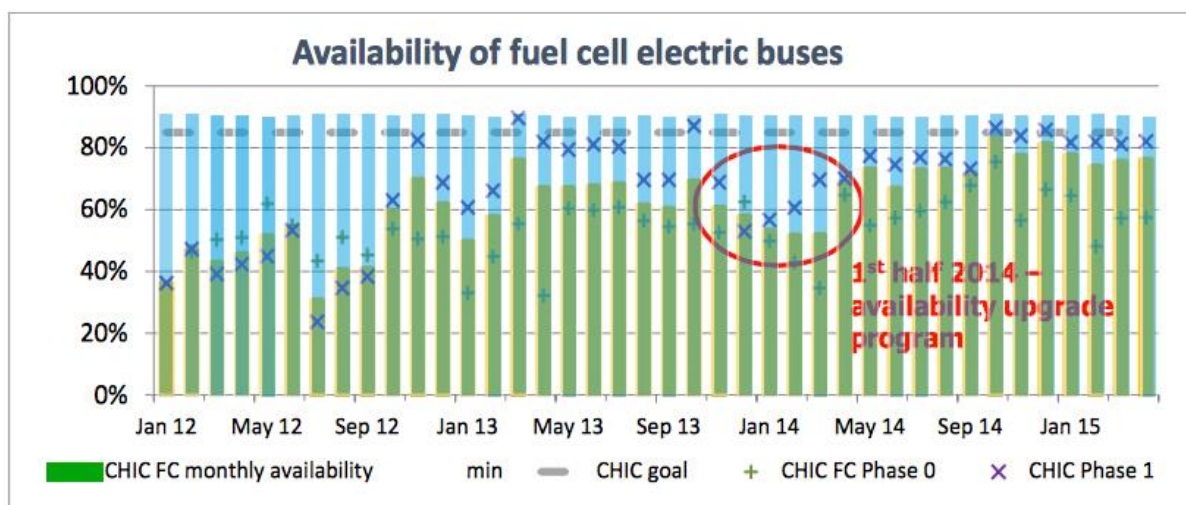


Abbildung 23: Verfügbarkeit der Brennstoffzellenbusse bei CHIC (grün) im Vergleich zu den Wasserstoffbussen der BVG (blau) (Quellen: CHIC und BVG)

Die Verfügbarkeit der Wasserstoffbusflotte war über die gesamte Projektlaufzeit sehr hoch. Ihre Verlässlichkeit lag bei 92 % und ist damit vergleichbar zu Dieselnissen, deren Verfügbarkeit bei > 90 % liegt. Auch im Vergleich zur Brennstoffzellentechnologie, deren Daten im CHIC-Datenreporting zusammengefasst werden, wird deutlich, dass die Wasserstofftechnologie mit Verbrennungsmotoren deutlich zuverlässiger und stabiler läuft. In Abbildung 23 wird die Differenz zwischen beiden Wasserstofftechnologien deutlich, bei der die Brennstoffzellentechnologie aktuell eine Verfügbarkeit von 80 % anstrebt, die die Wasserstoffbusse der BVG über die Jahre kontinuierlich weit übererfüllt hat. **Dem Projekt ist es somit überzeugend gelungen, den Nachweis einer hohen, dem Diesel-Antriebsstrang vergleichbaren Langzeitstandfestigkeiten der Wasserstofftechnologie mit Verbrennungsmotor zu erbringen.**

**2. Nachweis der Wirtschaftlichkeit der Technologie über den gesamten Lebenszyklus:** Insgesamt legte die Wasserstoffbusflotte während des Forschungsprojekts 497.127 km zurück, wobei der monatliche Spitzenwert bei 12.532 km lag. Zusammen mit den Fahrleistungen im Vorgängerprojekt verfügt die Wasserstoffbusflotte über eine Gesamtleistung unter Forschungsbedingungen von 898.477 km. Im Vergleich zu den jeweiligen Wasserstoff-Pkw-Flotten innerhalb der CEP hatte die Wasserstoffbus-Flotte dementsprechend eine um etwa zwei Drittel höhere Kilometerleistung im selben Zeitraum (vgl. Abbildung 24).



Abbildung 24: Fahrzeugbezogene Fahrleistungen der CEP-Partner Mobilität/Pkw im Verhältnis zur BVG (Quelle: Spilett GmbH)

Insgesamt wurden 6.711 Betankungen vorgenommen: Bei einer durchschnittlichen Betankungszeit von 12 min und einer durchschnittlichen Fließrate von 1,44 kg/min wurden die Busse mit durchschnittlich 17,31 kg Wasserstoff betankt. Der Verbrauch lag bei durchschnittlich 21,93 kg auf 100 km, der Gesamtverbrauch der Flotte lag bei 110.623,33 kg Wasserstoff. Die für die Busse eingesetzten Kosten lagen bei durchschnittlich 143,60 EUR/100 km – darin sind sowohl die Wasserstoffkosten (130,11 EUR/100 km) als auch die Wartungs- und Reparaturkosten (13,49 EUR/100 km) enthalten.

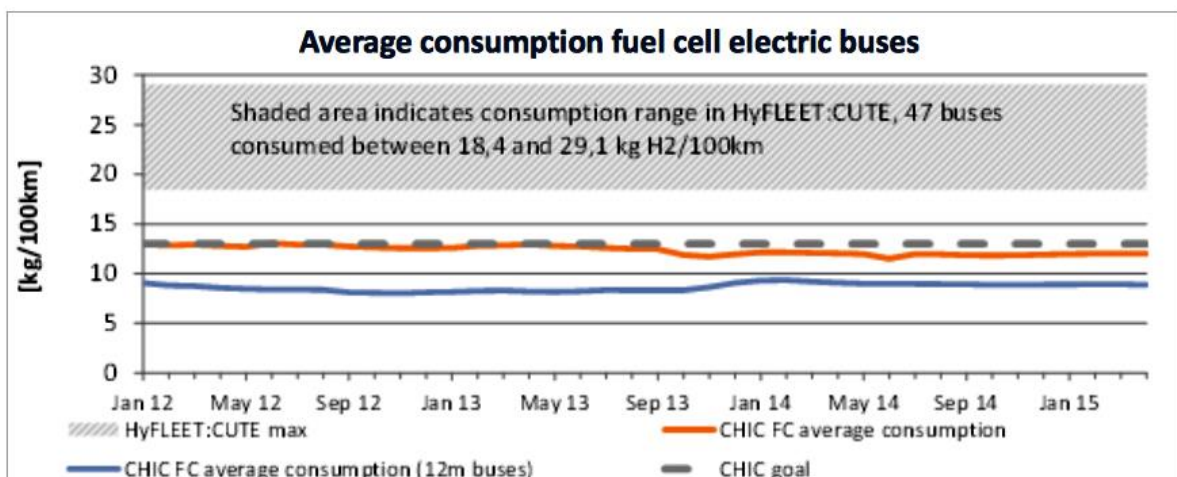


Abbildung 25: Durchschnittlicher Wasserstoffverbrauch der Wasserstoffbusse im CHIC-Projekt

Der Wasserstoffverbrennungsmotor erreichte im normalen Linienbetrieb eine zu Dieselmotoren vergleichbar hohe Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit, weshalb die Wartungs- und Reparaturkosten in etwa den Kosten für den Betrieb von Dieselmotoren entsprachen. Allerdings lagen die Kosten für den Wasserstoff im Vergleich zum Diesel höher: Ein 12 m langer Bus verbraucht etwa 40 Liter Diesel pro 100 Kilometer, was bei einem Preis von 1,40 EUR pro Liter eine Summe von 44 EUR/100 km ausmacht. Solange Wasserstoff als Kraftstoff noch vor der Markteinführung steht, kann diese Diskrepanz nur durch eine Förderung ausgeglichen werden, damit der Betrieb der Wasserstoffbusse wirtschaftlich tragfähig gestaltet werden kann. Auch innerhalb der Wasserstofftechnologien sind die Kosten der Wasserstoffverbrenner hinsichtlich des Wasserstoffverbrauchs höher als die von 12-m-

Bussen mit Brennstoffzellenantrieb, die durchschnittlich 9 kg/H<sub>2</sub> auf 100 km verbrauchen (vgl. Abbildung 25).

Hinsichtlich der Einschätzung zur Wirtschaftlichkeit der Wasserstoffverbrennungsmotoren sind jedoch mehrere Punkte zu beachten: Zum einen handelt es sich bei den im Projekt genutzten Bussen um eine 10 Jahre alte Technologie, die im Hinblick auf ihre Effizienz nicht weiter modifiziert wurde. Da die Wasserstoffverbrennungsmotoren in ihrem Aufbau jedoch Gasverbrennungsmotoren als Grundlage haben, ist die Umsetzung von Innovationen der letzten Jahre bei Gasverbrennungsmotoren auch für Wasserstoffverbrennungsmotoren möglich, so dass von neueren Modellen ein wesentlich niedriger Verbrauch zu erwarten wäre. Darüber hinaus wäre eine Entwicklung von bivalenten Motoren unbedingt zu fördern, die mit verschiedenen Kraftstoffen betrieben werden können. So wie heute bereits Kraftfahrzeuge mit einem Verbrennungsmotor betrieben werden, der sowohl mit Benzin als auch mit Erd-, Bio- oder Flüssiggas betrieben werden kann, wäre eine ähnliche Entwicklung für den Wasserstoffverbrennungsmotor technisch ohne Probleme umzusetzen. Dies hätte auch den Vorteil, dass die Investitionsentscheidungen vor dem Hintergrund der Variabilität von Kraftstoffen getroffen werden könnten.

Ein weiterer Punkt ist, dass die Möglichkeit Kosten zu reduzieren, indem Nebenproduktwasserstoff genutzt wird (Wasserstoffverbrennungsmotoren können auch mit Wasserstoff von niedriger Qualität fahren), innerhalb des Projekts nicht umgesetzt werden konnte. Zwar führte die BVG Gespräche mit TOTAL zum Einsatz von Nebenproduktwasserstoff, da die Tankstelle Heerstraße jedoch auch den Pkw der CEP Wasserstoff vorhalten musste, und diese Wasserstoff der Qualität 5.0 benötigen, konnte der wesentlich preiswertere Nebenproduktwasserstoff nicht betankt werden. Im unmittelbaren Vergleich der Kosten zur Brennstoffzellentechnologie sind schließlich auch die Kosten sowohl für die Anschaffung der Busse, als auch für den Austausch der Brennstoffzelle zu beachten: Brennstoffzellenbusse sind in der Anschaffung nicht nur wesentlich teurer als Busse mit Wasserstoffverbrennungsmotoren, da die Brennstoffzelle zudem ca. alle 4 Jahre ausgetauscht werden muss, entstehen im Laufe eines 10-jährigen Betriebsleben eines Brennstoffzellenbusses kontinuierlich hohe Kosten.

Insgesamt stehen somit deutlich niedrigere Kosten der Wasserstoffverbrennungstechnologie der aktuellen Brennstoffzellentechnologie gegenüber. **Unter der Voraussetzung, dass neuere Generationen von Wasserstoffverbrennungsmotoren weniger Wasserstoff benötigen und im Zuge des Markteintritts von Wasserstoff als Kraftstoff bzw. durch den Einsatz von Nebenproduktwasserstoff die Preise für Wasserstoff sinken, wäre diese Technologie nach Berechnungen der BVG über den gesamten Lebenszyklus eines Wasserstoffbusses wirtschaftlich zu betreiben.**

### **3. Auslastung bestehender Infrastrukturen durch hohe Abnahmemengen, wie sie durch den Betrieb von Pkw allein im Rahmen der CEP nicht erreicht werden können:**

Zwar stellte die Einführung von Wasserstoff als Kraftstoff im ÖPNV erhebliche Anforderungen an eine leistungsfähige Infrastruktur, zugleich führte diese auch zu wirtschaftlich attraktiven Umsatzmengen und erhöht damit die Erfolgsaussichten der Markteinführung maßgeblich. Ein weiterer technologieoffener Ausbau der Busflotten sollte daher förderseitig Berücksichtigung finden. Als Forschungsprojekt war der Betrieb der Wasserstoffbusse nicht zuletzt für andere Forschungsprojekte von Bedeutung. So erlaubte die stetige Betankung großer Mengen Wasserstoff die Auslastung bestehender Infrastrukturen wie sie durch den Betrieb von Pkw allein im Rahmen der CEP nicht erreicht werden können – sowohl die TOTAL-Tankstelle an der Heerstraße als auch die Shell-Tankstelle am Sachsendamm konnten im Zusammenhang mit dem Projekt mit guten Auslastungsraten gefahren und eine **Erhöhung der Wirtschaftlichkeit der gesamten Versorgungskette** hiermit erreicht werden. Durch die Abnahme von hohen Wasserstoffmengen konnten die installierten Betankungstechnologien inklusive Speichersystemen, Kompressoren und Abgabeeinheiten erprobt werden. Das Projekt ermöglichte somit die Erhebung und Bereitstellung von Daten wie sie in diesem Umfang innerhalb der CEP von OEMs aufgrund der Flottengrößen bis

dato nicht erhoben werden konnten. Das hier abgeschlossene Projekt ermöglichte somit, dass beim Betrieb der Forschungstankstellen wesentliche Erkenntnisse durch die Auslastung der Infrastruktur gewonnen werden konnten.



Abbildung 26: Wasserstoffbus an der Tankstelle Sachsenamm

#### 4. Umfassender Know-how-Aufbau im Umgang mit der Wasserstofftechnologie beim Betreiber durch Übernahme der Serviceverantwortung vom Fahrzeughersteller:

Im Rahmen des Vorhabens konnte die BVG umfassendes **Know-how** im Zusammenhang mit dem **Service und der Wartung der Wasserstofftechnologie** aufbauen und damit einer der wesentlichen Zielsetzungen des Vorhabens entsprechen. Die BVG war hiermit in der Lage, die Fahrzeuge ohne Unterstützung des Herstellers mit eigenen Ressourcen zu betreiben. Die Qualifizierung des Servicepersonals vor Ort diente somit der Sicherstellung der Fahrzeugverfügbarkeit, da das Personal in die Lage versetzt wurde, eine zeitnahe Durchführung notwendiger Wartungsmaßnahmen und kleinerer Reparaturen und hiermit eine möglichst große Fahrleistung der Flotte sicherzustellen. Die im Rahmen des Projekts entwickelten Verfahren und Standards in den Bereichen Wartung von Wasserstoffbussen und Werkstattbetrieb wird maßgeblichen Einfluss auf die wirtschaftliche Machbarkeit der Technologie in Zukunft haben.

#### A.3.3 Aufwand und Kosten

[...]

#### A.3.4 Verwertbarkeit der Ergebnisse

Obwohl es der Forschung im Zuge des Vorhabens gelungen ist, den Nachweis einer hohen, dem Diesel-Antriebsstrang vergleichbaren Langzeitstandfestigkeiten der Wasserstofftechnologie mit Verbrennungsmotor zu erbringen, werden der Wasserstoffverbrennungstechnologie seitens der BVG inzwischen keine wesentlichen Erfolgsaussichten mehr zugemessen. **Die klare Bevorzugung der Brennstoffzellentechnologie von Fördergeberseite ging mit einer Absage an die Förderung weiterer Maßnahmen im Zusammenhang der Wasserstoffverbrennungstechnologie einher. Dies wird seitens der BVG auch als eine deutliche politische Absage an diese Technologie verstanden.** Dementsprechend wurde das bereits geplante Projekt zur Anschaffung und zum Betrieb von fünf Wasserstoffhybrid-Gelenkombussen (ausgestattet mit Verbrennungsmotor und elektrischem Antrieb) bereits im Jahr 2013 nicht weiterverfolgt. Aufgrund dieser Entwicklung gibt es auch seitens der Hersteller (neben MAN war auch die Firmen Vossloh-Kiepe, Solaris und Alset an der Entwicklung



von Bussen mit Wasserstoffverbrennungsmotoren interessiert) kein weiteres Engagement im Bereich der Wasserstoffverbrennungstechnologie.

Insgesamt ist der Wegfall der Förderung für diesen Strang der Wasserstofftechnologie und die einseitige Befürwortung der Brennstoffzellentechnologie aus Sicht der BVG zu bedauern. Hier wurde einer Technologie die Absage erteilt, die aufgrund ihrer Betriebssicherheit das Potenzial zur Brückentechnologie auf dem Weg zur Elektromobilität mit Brennstoffzelle hat. Wie dieses Projekt eindrücklich nachweisen konnte, liegen die Vorteile der Verbrennungstechnologie in ihrer Standfestigkeit, in ihrer potenziellen Wirtschaftlichkeit und in ihrer hinsichtlich der Wartung nahezu unproblematischen Integration in die Betriebsabläufe des ÖPNV. Vor diesem Hintergrund erscheint ein weiteres Engagement für die BVG nicht weiter sinnvoll, wenngleich die Technologie im Rahmen des Vorhabens den Weg zur Marktreife erfolgreich unter Beweis stellen konnte. Die Erprobung und der Einsatz der Brennstoffzellentechnologie hingegen ist angesichts hoher Beschaffungskosten, angesichts einer mangelnden Servicefähigkeit durch den Betreiber und angesichts z. T. hoher Ausfallzeiten der Fahrzeuge und damit einer geringen Eignung für den Liniendienst für die BVG derzeit keine Option.

Monat	GH2 Anzahl	GH2 [kg]	Fahrleistung [km]	durchschn. Verbrauch [kg/100km]	Betankungsdauer [min]	durchschn. Fließrate [kg/min]
Jan 2011	163	2.910,82	10.734,00	27,12	2.247	1,30
Feb 2011	154	2.526,44	9.898,00	25,52	2.168	1,17
Mrz 2011	153	2.612,94	10.121,00	25,82	2.439	1,07
Apr 2011	94	1.521,50	6.424,00	23,68	877	1,73
Mai 2011	138	2.504,70	9.205,00	27,21	1.451	1,73
Jun 2011	127	2.359,37	8.085,00	29,18	1.249	1,89
Jul 2011	107	2.189,61	7.956,00	27,52	1.192	1,84
Aug 2011	150	2.928,45	11.011,00	26,60	1.412	2,07
Sep 2011	143	2.680,68	10.407,00	25,76	1.343	2,00
Okt 2011	113	2.069,20	8.548,00	24,21	1.084	1,91
Nov 2011	167	2.886,27	12.532,00	23,03	1.667	1,73
Dez 2011	142	2.252,56	10.174,00	22,14	1.297	1,74
<b>2011</b>	<b>1.651</b>	<b>29.443</b>	<b>115.095,00</b>	<b>25,58</b>	<b>18.426</b>	<b>1,60</b>

Monat	GH2 Anzahl	GH2 [kg]	Fahrleistung [km]	durchschn. Verbrauch [kg/100km]	Betankungsdauer [min]	durchschn. Fließrate [kg/min]
Jan 2012	154	2.452,85	11.111,00	22,08	1.432	1,71
Feb 2012	154	2.698,04	12.373,00	21,81	1.630	1,66
Mrz 2012	165	2.582,95	12.192,00	21,19	1.734	1,49
Apr 2012	122	2.015,37	9.620,00	20,95	1.278	1,58
Mai 2012	146	2.367,80	10.134,00	23,36	1.387	1,71
Jun 2012	121	1.935,76	8.188,00	23,64	1.161	1,67
Jul 2012	105	1.566,20	7.242,00	21,63	982	1,59
Aug 2012	108	1.772,05	7.996,00	22,16	1.151	1,54
Sep 2012	86	1.432,25	6.369,00	22,49	927	1,55
Okt 2012	86	1.303,39	6.218,00	20,96	879	1,48
Nov 2012	85	1.429,37	6.858,00	20,84	951	1,50
Dez 2012	83	1.336,39	6.077,00	21,99	821	1,63
<b>2012</b>	<b>1.415</b>	<b>22.892</b>	<b>104.378,00</b>	<b>21,93</b>	<b>14.333</b>	<b>1,60</b>

Monat	GH2 Anzahl	GH2 [kg]	Fahrleistung [km]	durchschn. Verbrauch [kg/100km]	Betankungsdauer [min]	durchschn. Fließrate [kg/min]
Jan 2013	91	1.419,89	6.474,00	21,93	901	1,58
Feb 2013	97	1.482,73	7.083,00	20,93	895	1,66
Mrz 2013	118	1.679,89	7.347,00	22,86	1.099	1,53
Apr 2013	145	1.936,63	9.046,00	21,41	1.244	1,56
Mai 2013	120	1.826,71	8.753,00	20,87	1.270	1,44
Jun 2013	112	1.695,84	7.774,00	21,81	1.052	1,61
Jul 2013	96	1.329,89	6.406,00	20,76	897	1,48
Aug 2013	129	1.995,81	9.339,00	21,37	1.313	1,52
Sep 2013	140	2.161,04	9.960,00	21,70	1.444	1,50
Okt 2013	127	1.881,88	8.722,00	21,58	1.128	1,67
Nov 2013	148	2.261,44	10.453,00	21,63	1.410	1,60
Dez 2013	83	1.233,91	5.684,00	21,71	826	1,49
<b>2013</b>	<b>1.406</b>	<b>20.906</b>	<b>97.041,00</b>	<b>21,54</b>	<b>13.479</b>	<b>1,55</b>

Monat	GH2 Anzahl	GH2 [kg]	Fahrleistung [km]	durchschn. Verbrauch [kg/100km]	Betankungsdauer [min]	durchschn. Fließrate [kg/min]
Jan 2014	68	1.734,94	8.059,00	21,53	1.593	1,09
Feb 2014	64	1.025,28	5.327,00	19,25	1.352	0,76
Mrz 2014	56	903,11	4.907,00	18,40	1.080	0,84
Apr 2014	46	832,47	4.239,00	19,64	981	0,85
Mai 2014	67	1.803,69	9.476,00	19,03	1.629	1,11
Jun 2014	58	1.528,07	7.964,00	19,19	1.345	1,14
Jul 2014	37	879,97	4.779,00	18,41	826	1,07
Aug 2014	10	204,83	1.085,00	18,88	339	0,60
Sep 2014	65	1.575,54	8.465,00	18,61	1.544	1,02
Okt 2014	59	1.458,85	7.643,00	19,09	1.287	1,13
Nov 2014	70	1.952,76	10.058,00	19,41	1.749	1,12
Dez 2014	48	1.470,00	7.726,00	19,03	1.451	1,01
<b>2014</b>	<b>648</b>	<b>15.370</b>	<b>79.728,00</b>	<b>19,28</b>	<b>15.176</b>	<b>1,01</b>

Abbildung 27: Auflistung der Betriebsdaten über die Projektlaufzeit



		Füllmengen in kg der NEOMAN-Busse bei Füllungen von Vordruck p-Anfang auf Druck p-Ende																																						Volumen 2,05m³	
KF	p-Anfang	KF- Kompressibilitäts bei p																																							
		1,006	1,013	1,019	1,026	1,032	1,039	1,045	1,052	1,058	1,065	1,072	1,078	1,085	1,091	1,098	1,105	1,112	1,118	1,125	1,132	1,139	1,146	1,152	1,159	1,166	1,173	1,180	1,187	1,194	1,201	1,208	1,215	1,222	1,229	1,236	1,243	1,250	1,258	1,265	1,272
	p-Ende	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150	160	170	180	190	200	210	220	230	240	250	260	270	280	290	300	310	320	330	340	350	360	370	380	390	400
1,000	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150	160	170	180	190	200	210	220	230	240	250	260	270	280	290	300	310	320	330	340	350	360	370	380	390	400
1,006	10	0	1,81	3,59	5,36	7,10	8,81	10,51	12,18	13,84	15,47	17,09	18,68	20,25	21,81	23,34	24,86	26,35	27,83	29,29	30,73	32,15	33,56	34,95	36,32	37,68	39,02	40,34	41,64	42,93	44,20	45,46	46,70	47,93	49,15	50,35	51,53	52,70	53,85	54,99	56,12
1,013	20	0	1,79	3,55	5,29	7,01	8,70	10,38	12,03	13,67	15,28	16,87	18,45	20,00	21,54	23,05	24,54	26,02	27,48	28,92	30,34	31,75	33,14	34,52	35,87	37,21	38,53	39,83	41,12	42,39	43,65	44,90	46,13	47,34	48,55	49,73	50,89	52,05	53,19	54,31	
1,019	30	0	1,76	3,50	5,22	6,92	8,59	10,25	11,88	13,49	15,08	16,66	18,21	19,75	21,26	22,76	24,23	25,69	27,13	28,56	29,96	31,35	32,73	34,09	35,42	36,74	38,05	39,33	40,61	41,87	43,11	44,34	45,56	46,76	47,94	49,11	50,26	51,40	52,53		
1,026	40	0	1,74	3,46	5,16	6,83	8,49	10,12	11,73	13,33	14,90	16,45	17,99	19,50	21,00	22,48	23,93	25,37	26,80	28,21	29,60	30,97	32,33	33,66	34,98	36,29	37,57	38,85	40,11	41,35	42,58	43,80	45,00	46,18	47,35	48,50	49,64	50,77			
1,032	50	0	1,72	3,41	5,09	6,74	8,38	9,99	11,58	13,16	14,71	16,25	17,76	19,25	20,73	22,19	23,63	25,05	26,46	27,85	29,23	30,58	31,92	33,24	34,54	35,83	37,10	38,36	39,61	40,84	42,05	43,26	44,44	45,60	46,76	47,90	49,02				
1,039	60	0	1,70	3,37	5,03	6,66	8,27	9,87	11,44	13,00	14,53	16,05	17,54	19,02	20,48	21,92	23,34	24,75	26,14	27,51	28,87	30,21	31,53	32,83	34,12	35,39	36,65	37,89	39,12	40,34	41,54	42,72	43,89	45,04	46,18	47,31					
1,045	70	0	1,67	3,33	4,96	6,57	8,17	9,74	11,29	12,83	14,34	15,84	17,32	18,77	20,21	21,64	23,05	24,44	25,81	27,17	28,50	29,82	31,13	32,42	33,69	34,95	36,19	37,42	38,64	39,84	41,02	42,19	43,34	44,48	45,61						
1,052	80	0	1,66	3,29	4,90	6,50	8,07	9,63	11,16	12,67	14,17	15,65	17,10	18,55	19,97	21,38	22,77	24,14	25,50	26,83	28,15	29,46	30,75	32,02	33,28	34,52	35,75	36,97	38,17	39,35	40,52	41,67	42,81	43,94							
1,058	90	0	1,63	3,24	4,83	6,41	7,96	9,50	11,01	12,51	13,98	15,44	16,88	18,31	19,71	21,10	22,48	23,84	25,17	26,49	27,79	29,08	30,36	31,62	32,86	34,09	35,31	36,51	37,69	38,85	40,01	41,15	42,28								
1,065	100	0	1,61	3,21	4,78	6,34	7,87	9,38	10,88	12,36	13,81	15,26	16,68	18,09	19,48	20,85	22,21	23,54	24,86	26,17	27,46	28,73	29,99	31,23	32,46	33,68	34,88	36,06	37,23	38,38	39,52	40,65									
1,072	110	0	1,60	3,17	4,73	6,27	7,78	9,27	10,75	12,21	13,65	15,07	16,48	17,87	19,24	20,60	21,94	23,26	24,56	25,85	27,12	28,38	29,63	30,86	32,07	33,27	34,45	35,62	36,77	37,91	39,04										
1,078	120	0	1,57	3,13	4,66	6,17	7,67	9,15	10,60	12,05	13,47	14,88	16,27	17,64	19,00	20,33	21,65	22,96	24,25	25,52	26,78	28,02	29,25	30,47	31,67	32,85	34,02	35,17	36,31	37,44											
1,085	130	0	1,56	3,10	4,61	6,10	7,58	9,04	10,48	11,90	13,31	14,70	16,07	17,43	18,77	20,09	21,39	22,68	23,95	25,21	26,46	27,69	28,90	30,10	31,28	32,45	33,60	34,74	35,87												
1,091	140	0	1,53	3,04	4,54	6,01	7,47	8,91	10,34	11,74	13,13	14,51	15,86	17,20	18,52	19,82	21,11	22,39	23,64	24,89	26,12	27,33	28,54	29,72	30,88	32,04	33,18	34,30													
1,098	150	0	1,51	3,01	4,48	5,94	7,38	8,81	10,21	11,60	12,98	14,34	15,67	16,99	18,30	19,58	20,86	22,12	23,36	24,59	25,81	27,01	28,19	29,36	30,51	31,65	32,78														
1,105	160	0	1,50	2,98	4,43	5,88	7,30	8,71	10,10	11,47	12,83	14,16	15,48	16,79	18,08	19,35	20,61	21,85	23,08	24,30	25,50	26,68	27,85	29,00	30,14	31,27															
1,112	170	0	1,49	2,95	4,39	5,81	7,22	8,61	9,98	11,34	12,67	13,99	15,30	16,59	17,86	19,12	20,36	21,59	22,81	24,01	25,19	26,36	27,51	28,65	29,78																
1,118	180	0	1,45	2,89	4,31	5,72	7,11	8,48	9,84	11,18	12,50	13,80	15,09	16,36	17,62	18,87	20,10	21,31	22,51	23,69	24,86	26,01	27,15	28,28																	
1,125	190	0	1,44	2,86	4,27	5,66	7,03	8,39	9,72	11,04	12,35	13,64	14,91	16,17	17,41	18,64	19,86	21,06	22,24	23,41	24,56	25,70	26,83																		
1,132	200	0	1,42	2,83	4,22	5,60	6,95	8,29	9,61	10,91	12,20	13,47	14,73	15,98	17,21	18,42	19,63	20,81	21,97	23,13	24,27	25,39																			
1,139	210	0	1,41	2,80	4,18	5,54	6,87	8,19	9,49	10,78	12,06	13,31	14,56	15,79	17,01	18,21	19,39	20,55	21,71	22,85	23,97																				
1,146	220	0	1,40	2,78	4,13	5,47	6,79	8,09	9,38	10,66	11,91	13,16	14,39	15,60	16,81	17,99	19,15	20,31	21,45	22,57																					
1,152	230	0	1,36	2,72	4,05	5,37	6,68	7,97	9,24	10,50	11,74	12,97	14,19	15,39	16,57	17,74	18,89	20,03	21,16																						
1,159	240	0	1,35	2,69	4,01	5,31	6,60	7,87	9,13	10,38	11,61	12,82	14,02	15,20	16,37	17,52	18,66	19,79																							
1,166	250	0	1,34	2,65	3,96	5,25	6,52	7,78	9,02	10,25	11,47	12,67	13,85	15,02	16,17	17,31	18,44																								
1,173	260	0	1,32	2,62	3,91	5,19	6,44	7,69	8,92	10,13	11,34	12,52	13,68	14,84	15,98	17,10																									
1,180	270	0	1,30	2,59	3,87	5,12	6,37	7,60	8,82	10,02	11,20	12,36	13,52	14,66	15,78																										
1,187	280	0	1,29	2,56	3,82	5,07	6,30	7,51	8,71	9,89	11,06	12,21	13,35	14,48																											
1,194	290	0	1,27	2,53	3,78	5,01	6,22	7,42	8,61	9,77	10,92	12,06	13,19																												
1,201	300	0	1,26	2,50	3,73	4,95	6,15	7,33	8,50	9,65	10,79	11,92																													
1,208	310	0	1,24	2,47	3,69	4,89	6,07	7,24	8,39	9,53	10,66																														
1,215	320	0	1,23	2,45	3,65	4,83	5,99	7,15	8,29	9,42																															
1,222	330	0	1,22	2,42	3,60	4,76	5,92	7,06	8,19																																
1,229	340	0	1,20	2,38	3,55	4,70	5,84	6,97																																	
1,236	350	0	1,18	2,35	3,50	4,64	5,77																																		
1,243	360	0	1,16	2,31	3,45	4,58																																			
1,250	370	0	1,14	2,28	3,40																																				
1,258	380	0	1,16	2,28																																					
1,265	390	0	1,14																																						
1,272	400	0																																							

Hinweis: Die GH2-Temperaturen vor und nach der Betankung im Bus haben Einfluß auf die Kompressibilitätskoeffizienten  
 Die oben dargestellten Befüll-Massen an Wasserstoff gelten annähernd für geringe Abweichungen der Gas-Temperaturen im Bus-Druck-Behälter vor und nach der Befüllung gegenüber 0°C

Abbildung 28: Füllmengen in kg der Wasserstoffbusse bei Füllungen von Vordruck p-Anfang auf Druck p-Ende