

Modellregion Elektromobilität Hamburg: Erprobung und betriebliche und technische Optimierung der Dieselhybridbusse bei der HOCHBAHN

- Schlussbericht -

| | |
|-------------------------|--|
| Zuwendungsempfänger: | Hamburger Hochbahn AG |
| Förderkennzeichen: | 03EM0202 |
| Vorhabenbezeichnung: | Erprobung und betriebliche und technische Optimierung der Dieselhybridbusse bei der HOCHBAHN |
| Laufzeit des Vorhabens: | 01. Oktober 2011 – 31. Dezember 2013 |
| Berichtszeitraum: | 01. Oktober 2011 – 31. Dezember 2013 |

Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministers für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung unter dem Förderkennzeichen 03EM0202 gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Autor.

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Verkehr und
digitale Infrastruktur

Koordiniert durch:



Nationale Organisation Wasserstoff-
und Brennstoffzellentechnologie



Inhaltsverzeichnis

| | | |
|-------|---|----|
| I | Kurzfassung | 4 |
| II | Ziele und Planung | 5 |
| II.1 | Voraussetzungen für die Durchführung des Vorhabens | 7 |
| II.2 | Wissenschaftlicher und technischer Stand vor Projektbeginn..... | 9 |
| II.3 | Planung und Ablauf des Vorhabens | 9 |
| II.4 | Zusammenarbeit mit anderen Stellen..... | 11 |
| III | Wissenschaftlich-technische Ergebnisse..... | 13 |
| III.1 | Teilprojekt 1: Betrieb der Fahrzeuge und Evaluation der Erprobung bei der HOCHBAHN | 13 |
| III.2 | Teilprojekt 2: Technische Betreuung | 34 |
| III.3 | Teilprojekt 3: Optimierung Instandhaltung | 38 |
| III.4 | Teilprojekt 4: Kommunikation und Dokumentation | 42 |
| IV | Zusammenfassung, Empfehlung, Ausblick..... | 45 |
| IV.1 | Zusammenfassung der Ergebnisse..... | 45 |
| IV.2 | Empfehlungen und Übertragbarkeit der Ergebnisse | 47 |
| IV.3 | Ausblick und weiterer Forschungsbedarf | 48 |
| V | Verwertung und Anschlussfähigkeit..... | 49 |
| V.1 | Voraussichtlicher Nutzen der Projektergebnisse | 49 |
| V.2 | Bekanntgewordener Fortschritt bei anderen Stellen während der Projektlaufzeit | 49 |
| V.3 | Veröffentlichung von Ergebnissen..... | 50 |
| VI | Berichtsblatt | 51 |
| VII | Document Control Sheet | 52 |

Verzeichnis der Abbildungen

| | |
|---|----|
| Abbildung 1 Arbeitsprogramm laut Vorhabenbeschreibung | 10 |
| Abbildung 2: Linienverläufe..... | 13 |
| Abbildung 3: Empfehlungen für Einsatzprofile von Dieselhybridbussen - Methodik..... | 17 |
| Abbildung 4: Clusterung der Gelenkbus-Linien nach mittlerer Fahrgeschwindigkeit, mittleren Haltestellenabstand und Anzahl Halte auf der Strecke (Größe der Bubbles) | 18 |
| Abbildung 5: Übersichtskarte der untersuchten Gelenkbus-Linien | 19 |
| Abbildung 6: Clusterung der Solobus-Linien nach mittlerer Fahrgeschwindigkeit, mittleren Haltestellenabstand und Anzahl Halte auf der Strecke (Größe der Bubbles) | 20 |
| Abbildung 7: Übersichtskarte der untersuchten Solobus-Linien | 21 |
| Abbildung 8: Hauptmaske des Exceltools | 26 |
| Abbildung 9: Verfügbarkeit nach Bussen | 37 |
| Abbildung 10: Umrüstpaket DHB | 40 |
| Abbildung 11: Auszug aus der Verfahrensanweisung der FFG | 41 |
| Abbildung 12: Ausschnitte des Energieflussdiagramms im Dieselhybridbus: Links bei der Energierückgewinnung, rechts im Hybridbetrieb..... | 43 |

Verzeichnis der Tabellen

| | |
|--|---|
| Tabelle 1: Projektbeteiligte..... | 11 |
| Tabelle 2: Laufleistung der fünf Dieselhybrid-Gelenkbusse gesamt und im Jahr 2013..... | 14 |
| Tabelle 3: Übersicht der gewählten Einsatzprofile für Gelenkbusse und deren Cluster..... | 18 |
| Tabelle 5: Messungen EvoBus-Dieselhybridgelenkbusse | 24 |
| Tabelle 6: Auswertung paralleler Hybrid | 29 |
| Tabelle 7: Auswertung der Liniencuster (serieller Hybrid) | 30 |
| Tabelle 8: Auswertung der Liniencuster (paralleler Hybrid) | 31 |
| Tabelle 9: Auswertung der Betriebshöfe (paralleler Hybrid) | 32 |
| Tabelle 10: Auflistung Personalaufwand bei FFG | 34 |
| Tabelle 11: Vergleich Förderantrag und Ist-Kosten | Fehler! Textmarke nicht definiert. |

I Kurzfassung

Im Rahmen des vom Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI) geförderten Vorhabens wurden fünf serielle Dieselhybridbusse des Herstellers EvoBus bei der Hamburger Hochbahn AG (HOCHBAHN) im Liniendienst erprobt. Wesentliche Ergebnisse des Feldtests sind:

- Es waren insgesamt fünf serielle Dieselhybridbusse im Einsatz. Innerhalb der Projektlaufzeit haben sie insgesamt 485.000 Kilometer zurückgelegt.
- Zwei Hybridbusse wurde bereits im vorangegangenen Vorhaben als Kunden-Feld-Erprobungsfahrzeuge (KFE)*, weitere drei als Vorserienfahrzeuge (VSF)* an die HOCHBAHN ausgeliefert. Im vorliegenden Anschlussvorhaben konnten ergänzend durch die betriebliche und technische Erprobung umfassende Langzeiterfahrungen zum Einsatz der Dieselhybridbusse gesammelt werden.
- Die Verfügbarkeit der Hybridbusse zeigte sich im Durchschnitt bei etwa 65% und hat sich innerhalb des Projektzeitraumes verstetigt. Sie blieb damit aber hinter den anfänglichen Erwartungen einer Verfügbarkeit von 80% zum Projektende zurück.
- Der Nachweis des rein elektrischen Fahrbetriebes aus der Batterie wurde erbracht. In Abhängigkeit von der Zahl der Fahrgäste, dem Ladestand der Batterien und den Anforderungen aus dem Verkehr können bis zu 13 Kilometer rein elektrisch gefahren werden.
- Im Projekt konnte eine systematische Bewertung vorgenommen werden, welche Treibstoffeinsparungen dieses Herstellers durch den Einsatz von Dieselhybridbussen mit serieller Antriebsstrangauslegung erreicht werden können. Der durchschnittliche Treibstoffverbrauch konnte im Vergleich zu einem Dieselbus mit Verbrennungsmotor um durchschnittlich etwa 13% gesenkt werden.
- Begleitend zur betrieblichen Erprobung der seriellen Dieselhybridbusse wurde durch ein umfangreiches Messprogramm auf ausgesuchten Linien der HOCHBAHN die Reduzierung der Kraftstoffverbräuche auf verschiedenen Linienprofilen evaluiert. Ziel dabei war es, Linienprofile zu identifizieren, die in Bezug auf Kraftstoffeinsparungen besonders geeignet für den Einsatz der seriellen Dieselhybridbusse sind. Ergänzend wurden auch Dieselhybridbusse mit parallel ausgelegtem Antriebsstrang in das Messprogramm integriert. Im direkten Vergleich konnten die parallelen Dieselhybridbusse vom Hersteller VOLVO etwa 20% Kraftstoffeinsparung ausweisen und zeigen damit wesentliche größere Einsparpotentiale als die seriellen Dieselhybridbusse von EvoBus (siehe auch III.1.3).
- Durch die Erstellung eines Simulationstools zur Verbrauchsprognose und mit den gemessenen linienspezifischen Verbrauchsreduzierungen der seriellen und parallelen Hybridbusse als Ausgangsdaten konnten die potentiellen Kraftstoffeinsparungen im gesamten Linien-

* Definitionen siehe auch Seite 5

netz der HOCHBAHN abgebildet werden. Zudem konnten die betrieblichen und linienbezogenen Rahmenbedingungen differenziert nach Antriebsauslegung identifiziert werden, die bei der Senkung der Treibstoffverbräuche besonders förderlich sind. Der Einfluss der Liniencharakteristik konnten in relativen Kraftstoffeinsparungen ausgewiesen werden und liegt bei den seriellen Dieselhybridbussen zwischen 9,6 – 13%, bei den parallelen Dieselhybridbussen zwischen 16,3 – 27,9%.

- Die Auswertung der Ergebnisse des Vorhabens bildet somit eine valide Ausgangsbasis zur Ausweitung des Einsatzes von Hybridbussen bei der HOCHBAHN. Die Ergebnisse bilden die grundlegenden Daten zum möglichst effizienten Einsatz von seriellen und parallelen Hybridbussen bei der HOCHBAHN. Sie werden daher bei der künftigen Einsatzplanung für die Umlaufbildung von Hybridbussen berücksichtigt und tragen so zu einem optimierten Betriebseinsatz bei.
- Anhand der Projektergebnisse zu Einsparpotentialen bei den parallelen Dieselhybridbussen wurde deren Einsatz auch unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten betrachtet. Dabei konnte zu heutigen Anschaffungspreisen bei einer Laufzeit von 10 Jahren noch kein Break Even im Vergleich zu konventionellen Dieselnbussen ausgewiesen werden (vgl. V.1Voraussichtlicher Nutzen der Projektergebnisse).
- Bei einer Betrachtung der wirtschaftlichen Konsequenzen ist neben den Einsparung an Kraftstoff von etwa 10-25% je nach Einsatzgebiet und Busantrieb zu berücksichtigen, dass der Wartungsaufwand der Hybridbusse derzeit nicht ausreichend genau beziffert werden kann. Viele Instandsetzungsmaßnahmen innerhalb des Projektes wurden noch über den Gewährleistungsvertrag der HOCHBAHN mit dem Hersteller EvoBus abgedeckt, sodass noch keine klare Kostenanalyse zum Instandsetzungsbedarf den Kraftstoffeinsparungen gegenübergestellt werden kann.

Per 31. Dezember 2013 wurde das Förderprojekt abgeschlossen. Die Erprobung der Dieselhybridbusse auf den Linien wird in den nächsten Jahren fortgesetzt, um weiterhin Langzeiterfahrungen im Alltagsbetrieb zu generieren und damit das Erreichen der vollständigen Marktfähigkeit zu unterstützen. Zudem werden fortlaufend auch Daten zu Laufleistung, Verfügbarkeit und Kraftstoffverbrauch erhoben und im Rahmen der laufenden Begleitforschungsaktivitäten der gemeinsamen Plattform Innovative Busantriebe des BMVI und BMUB zugeliefert und ausgewertet.

II Ziele und Planung

Der öffentliche Personennahverkehr mit Linienbussen trägt schon heute zur Entlastung unserer Städte von klima- und gesundheitsschädlichen Emissionen bei. So beträgt die Emission des Klimagases Kohlendioxid (CO₂) bei einem besetzten Bus je Fahrgast und Kilometer nur ca. 20 Gramm. Dennoch sind die Bushersteller und die Verkehrsunternehmen gefordert, noch emissi-

emissionsärmere Fahrzeuge zu entwickeln und einzusetzen, um die Luftqualität in Städten weiter zu verbessern und zum Klimaschutz beizutragen.

Aus Sicht der HOCHBAHN ist außerdem wegen der Einsatzdauer ihrer Busse von bis zu 14 Jahren eine rechtzeitige Ausrichtung auf einen sinkenden Verbrauch vor dem Hintergrund steigender Treibstoffpreise unumgänglich. In ihrer Unternehmensstrategie strebt die HOCHBAHN mittelfristig eine Umstellung ihrer Busse auf effizientere und noch klimaschonendere Antriebssysteme und eine Loslösung von rein fossilen Energieträgern an. Sie unterstützt deshalb die Fahrzeugindustrie bei der Optimierung innovativer (diesel-)elektrischer Hybridbusse mit Hochleistungsbatterien und Brennstoffzellen bereits in der Initialphase des Marktes durch Erprobung auf ihren Linien und gemeinsame technische Weiterentwicklung. Die Strategie der HOCHBAHN für ihre Busflotte ist darauf ausgerichtet, ab voraussichtlich 2020 in wachsendem Umfang Busse mit emissionsarmen oder vollständig emissionsfreien Antrieben einzusetzen.

Im Rahmen des vorherigen Vorhabens 03KP521 hat die HOCHBAHN fünf serielle Dieselhybridbusse erprobt. Der Praxisbetrieb von zwei als „Kundenfelderprobungsfahrzeugen“ (KFE) ausgelieferten Hybridbussen hat gezeigt, dass noch relevante Optimierungspotenziale zu erschließen sind, um eine mit konventionellen Dieselnissen vergleichbare Einsatztauglichkeit hinsichtlich der Verfügbarkeit zu erreichen. Erste Ansätze für die notwendigen technischen Optimierungen wurden bereits mit dem Hersteller zusammen aus dem Fahrzeugbetrieb analytisch abgeleitet und der technischen Weiterentwicklungen zugeführt. Diese sind in die Fahrzeuge der nächsten Busgeneration – der drei als „Vorserienfahrzeuge“ (VSF) in Betrieb genommenen Hybridbusse eingeflossen. Diese VSF befanden sich seit Mai 2011 bei der HOCHBAHN in der Erprobung. Die beiden vorhandenen KFE wurden dabei ebenfalls technisch auf den neuen Stand ertüchtigt.

Im vorliegenden Projekt wurden die schon erreichten technischen Verbesserungen an den Dieselhybridbussen unmittelbar auf ihre Wirksamkeit überprüft und die Arbeiten zur weiteren Optimierung kontinuierlich fortgesetzt. Auch die bislang entwickelte technische Expertise konnte genutzt und die erfolversprechende Zusammenarbeit mit der Industrie fortgeführt werden.

Im Mittelpunkt dieses Projektes stand daher die Erprobung der Dieselhybridbusse sowohl unter technischen wie auch betrieblichen Aspekten im Liniendienst, soweit die Verfügbarkeit der Hybridbusse gewährleistet war. Die technische Betreuung und Instandhaltung der Fahrzeuge sollte daher weiter optimiert werden. Der Betrieb der Fahrzeuge über einen ausreichend langen Zeitraum sollte quantitativ und qualitativ eine erheblich bessere Grundlage zur Bewertung bieten, ob die angestrebten Ziele etwa bei der Treibstoffverbrauchsreduzierung und der Alltagstauglichkeit erreicht werden können.

Die zu erwartende Fahrzeugverfügbarkeit der fünf Dieselhybridbusse im Feldtest ermöglichte die Erfassung wesentlicher technischer und betrieblicher Daten aus dem Einsatz auf verschiedenen Profilen und die systematische Ermittlung der Instandhaltungs- und Wartungsintensitäten verschiedener Komponenten an den Fahrzeugen. Die ausgewerteten Betriebsdaten und Er-

kenntnisse aus der technischen Betreuung bildeten die Grundlage für die Optimierung der Einsatzprofile und der Instandhaltungsprozesse. Vor dem Hintergrund einer anwachsenden Hybridbusflotte sollte für die künftige Einsatzplanung eine validierte Datengrundlage geschaffen werden, die einen verbrauchsoptimierten Linienbetrieb im gesamten Liniennetz der HOCHBAHN ermöglicht. Somit bildete die Datenevaluation und –auswertung einen wesentlichen Projektschwerpunkt. Eine begleitende öffentlichkeitswirksame Darstellung der Fahrzeugtechnologie im Rahmen des Vorhabens förderte zudem das Verständnis und die Akzeptanz dieses Antriebssystems in der Bevölkerung.

II.1 Voraussetzungen für die Durchführung des Vorhabens

In vielen Demonstrationsprojekten mit Dieselhybridbussen in den Modellregionen Elektromobilität hat in Deutschland die operative Erprobung der Fahrzeuge erste Ergebnisse hervorgebracht. Daher können entscheidende Fragen etwa zu den Minderverbräuchen oder der technischen Reife der Hybridbusse und ihrem Betriebsverhalten aufgrund der zur Verfügung stehenden Daten mittlerweile beantwortet werden.

Gesamtziel des Vorhabens

Im vorliegenden Vorhaben sollten die fünf Dieselhybridbusse auf den Linien der HOCHBAHN betrieben und praktisch erprobt werden. Ziel war es, eine aussagekräftige und ausreichend umfangreiche Datenbasis für die Evaluation der Fahrzeuge zu schaffen und zur Optimierung des Einsatzes von Dieselhybridbussen beizutragen.

Mit den fünf Fahrzeugen sollten im Projektzeitraum verlässliche Daten zur Fahrzeugtechnik (Fahrzeugeinsatzbereitschaft, Treibstoffverbrauch etc.) generiert werden. Nur so können die technischen Optimierungspotenziale sukzessive bis zur technischen Einsatzreife erschlossen werden.

Bereits heute sind eine wachsende Zahl von Verkehrsunternehmen dabei ihre Busflotten schrittweise auf Hybridfahrzeuge umstellen wird, wenn diese zu angemessenen wirtschaftlichen Konditionen eingesetzt werden können. Gerade im Hinblick auf diese zu erwartende wachsende Nachfrage ist das zeitnahe Erreichen dieser Einsatzreife dringend notwendig. Die Ergebnisse aus diesem Vorhaben tragen dazu bei, den möglichen Markteintritt von Dieselhybridbussen und ihren Beitrag zum Klimaschutz und zur Luftqualität in Städten besser und schneller bewerten zu können.

Auch für die spezifischen Belange des Linienbetriebs ist die Erhebung umfassender Daten der Fahrzeugleistungen essenziell. Es war daher zu evaluieren, inwieweit Hybridbusse vor allem für Ballungszentren mit kurzen Haltestellenabständen, hohem Verkehrsaufkommen und häufigen Stopp- und Anfahrvorgängen gut geeignet sind. Erwartungsgemäß könnten hier die stärksten Verbrauchsminderungen erreicht werden.

Neben der technischen Erprobung der Fahrzeuge zielte das Projekt darauf ab, unterschiedliche Linien- und Einsatzcharakteristika auf ihre Eignung für Dieselhybridbusse zu untersuchen. Um die Vorteile (reduzierte Treibstoffverbräuche, rein elektrisches Fahren) von Dieselhybridbussen besser zu erschließen, müssen die betrieblichen Einsatzbedingungen und die technischen Systeme stärker als bei konventionellen Bussen aufeinander abgestimmt werden. Dazu sollten von der HOCHBAHN gemeinsam mit EvoBus Untersuchungen durchgeführt und an den aktuellen Stand der Bustechnologie adaptiert werden. Im Kern zielte das Erkenntnisinteresse auf die bestmöglichen Einsatzbedingungen und eine optimierte technische Hybridstrangauslegung der Busse ab. Durch gleichzeitige Verbesserung der betrieblichen sowie der technischen Einsatzbedingungen sollte die größtmöglichen Kraftstoffeinparpotentiale erreicht werden.

Im Abgleich zu den Verbrauchseinsparungen der seriellen Dieselhybridbussen sollten auch parallele Hybridbusse der HOCHBAHN-Tochterunternehmen Friedr. Jasper Rund- und Gesellschaftsfahrten GmbH (Jasper) und Süderelbe Bus GmbH (SBG) einbezogen werden. So sollte eine direkte Vergleichbarkeit der zwei unterschiedlichen Antriebsstrangauslegungen gewährleistet werden. Erste Erprobungen beider Hybridtechnologien wiesen darauf hin, dass die Einsparpotentiale der parallelen Dieselhybridbusse mit durchschnittlich etwa 20% größer ausfallen als die der seriellen Hybridbusse mit durchschnittlich etwa 13%.

Die daraus erwachsenden Erkenntnisse fließen anschließend sowohl bei der HOCHBAHN in die Einsatzplanung wie auch in die technische Weiterentwicklung der Busse beim Hersteller ein. Die HOCHBAHN wirkt an der gemeinsamen Plattform des BMUB und des BMVI zur Evaluation innovativer Busse aktiv mit. Außerdem ist die HOCHBAHN in mehreren Arbeitsgruppen im Rahmen der vom Verband der Deutschen Verkehrsunternehmen (VDV) initiierten Plattform zur Evaluation von Linienbussen mit innovativen Antrieben aktiv.

Eingliederung in regionale Ziele und Strategien

Elektromobilität ist eines der wesentlichen Handlungsfelder Hamburgs, um die Einhaltung von Umwelt- und Klimaschutzziele sowie die Reduzierung von Geräuschemissionen durch den Verkehrssektor zu forcieren. Neben dem Aufbau von Ladeinfrastruktur und der Erprobung von Elektrofahrzeugen insbesondere im Wirtschaftsverkehr kommt der Demonstration und kontinuierlichen Weiterentwicklung innovativer Antriebstechnologien für Busse eine hohe Bedeutung zu.

Verkehrsunternehmen leisten bereits durch ihr bestehendes Serviceangebot einen relevanten Beitrag für einen umwelt- und klimafreundlichen Verkehr. Ziel war es nachzuweisen, dass sie künftig ihr Produkt konsequent technologisch noch weiter entwickeln und so ihren „Öko-Bonus“ mit wachsenden Fahrgastzahlen weiter ausbauen können. Damit ist sichergestellt, dass die Bedeutung und das Angebot des ÖPNV, gerade in urbanen Wachstumszentren wie Hamburg auch trotz einer aktuell stark steigenden Wahrnehmung elektrisch angetriebener Fahrzeuge bei den Entscheidungsträgern auf regionaler und nationaler Ebene weiter gewährleistet und ausge-

baut wird. Hybridbusse können bereits heute durch partiell elektrisches Fahren einen Beitrag zur Vermeidung von Emissionen und Lärm leisten.

II.2 Wissenschaftlicher und technischer Stand vor Projektbeginn

Ziel des Nationalen Förderprogramms für Elektromobilität ist vor allem die Ableitung technischer Optimierungspotenziale an Fahrzeugen und Komponenten aus der Praxis für deren zukünftigen kommerziellen Einsatz.

Zu Beginn des vorliegenden Projektes lagen aus dem vorangegangenen Vorhaben zur Beschaffung, Inbetriebnahme und technischen Optimierung der seriellen Dieselhybridbusse bereits erste Erkenntnisse zum Grad der Einsatztauglichkeit vor. Die Verfügbarkeit der KFE lag im Durchschnitt bei etwa 41%. Die drei VSF waren zu Beginn des Projektes erst drei Monate im Einsatz, daher ist deren durchschnittliche Verfügbarkeit, die mit etwa 80% angegeben wurde, aufgrund der fehlenden Laufleistung nicht aussagekräftig und vergleichbar. Die durchschnittliche Kraftstoffeinsparung wurde mit etwa 13% im Vergleich zum konventionellen Dieselbus angegeben. Die kumulierte Laufleistung aller fünf Dieselhybridbusse lag Ende September 2011 erst bei 100.550 km. Eine valide Einschätzung der Alltagstauglichkeit der Dieselhybridbusse ist aber erst nach etwa 40.000 km Laufleistung je Bus gegeben.

Neben technischen Optimierungsansätzen hat der Probebetrieb der seriellen Dieselhybridbusse auch erste Hinweise zu betrieblichen Frage- und Aufgabenstellungen ergeben. Dazu gehörten vor allem eine neue Bewertung der strecken- und einsatzspezifischen Parameter (Geschwindigkeit, Fahrgastzahlen, Haltestellenabstände etc.). Anders als bei konventionellen Bussen ist diesbezüglich zu bewerten, inwieweit die Vorteile des Hybridantriebes auch tatsächlich im Alltagsbetrieb genutzt werden können.

Mit Blick auf das vorliegende Projekt wurden sowohl quantitativ wie auch qualitativ wesentliche Erkenntnisse erwartet, die eine detaillierte Bewertung der Hybridtechnologie und deren betriebliche Effizienzpotentiale deutlich ausweisen. Relevante Fortschritte wurden insbesondere bei der Einsatzreife und dem Treibstoffverbrauch erwartet. Die Erfahrungen aus dem Betrieb sollten analysiert werden, und es sollten konkrete Empfehlungen zu geeigneten Einsatzprofilen erarbeitet werden.

II.3 Planung und Ablauf des Vorhabens

Die HOCHBAHN hat durch Vorhaben wie z.B. „Modellregion Elektromobilität Hamburg: Modul 1 Einsatz von Dieselhybridbussen bei der HOCHBAHN“ im Zeitraum November 2009 bis Juni 2011 erste Erfahrungen bei der praktischen Erprobung von Dieselhybridbussen sammeln können. Die Erprobung der Praxistauglichkeit von Fahrzeugen mit innovativen Antrieben ergänzend

zu der bestehenden HOCHBAHN-Busflotte basiert auf einer strategischen Entscheidung. Grundsätzlich plant HOCHBAHN für die Zukunft den sukzessiven Ersatz von konventionellen Dieselnissen durch Fahrzeuge mit innovativen Antriebstechnologien. Die wesentliche Fragestellung beim Einsatz von Hybridbussen als Brückentechnologie auf dem Weg zu emissionsfreien Antrieben ist, in welchem Umfang Kraftstoffeinsparungen möglich sind und welche technischen und betrieblichen Rahmenbedingungen diese Einsparungen begünstigen. Dieses Ziel wird mit einer möglichst zügigen und zielgerichteten Weiterentwicklung und Optimierung der derzeit verfügbaren Fahrzeuge mit Hybridantrieben unterstützt.

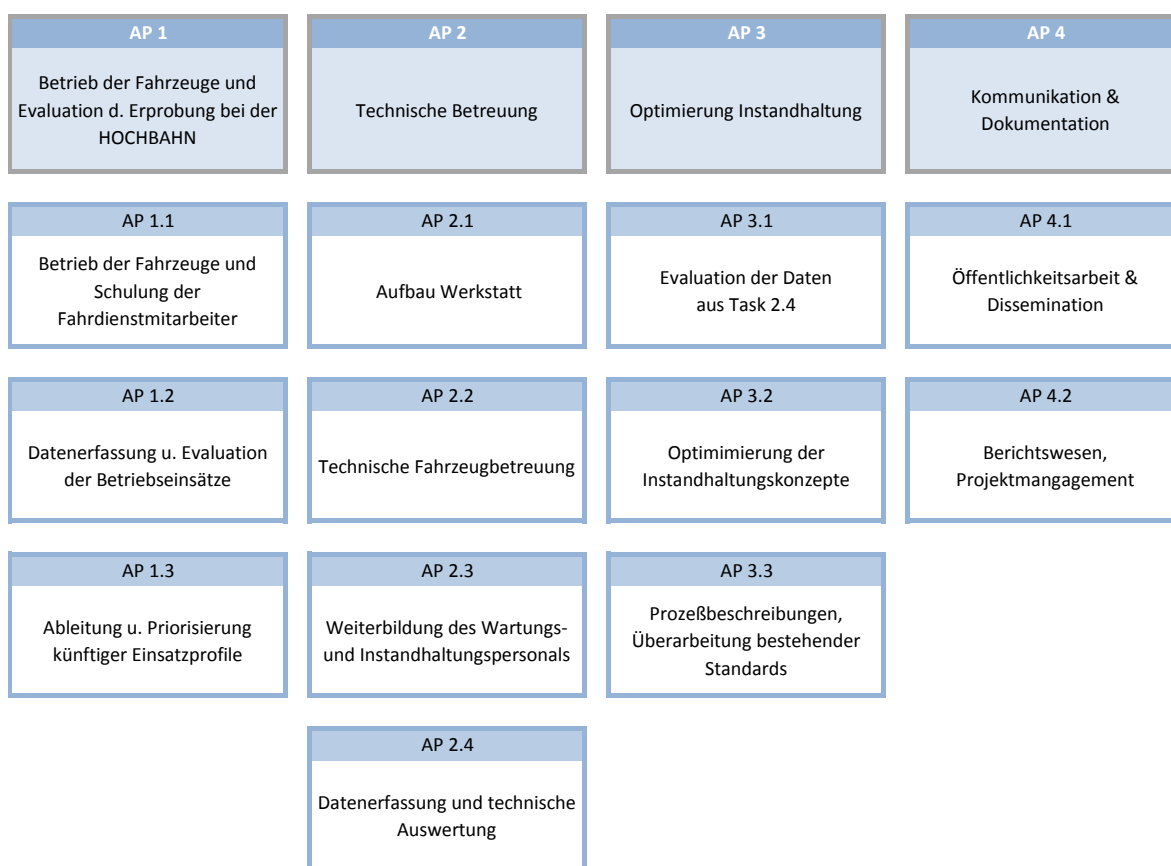


Abbildung 1: Arbeitsprogramm laut Vorhabenbeschreibung

Das vorliegende Projekt baut auf den Erkenntnissen und Aktivitäten der HOCHBAHN im Bereich der Erprobung innovativer Antriebe auf. Im Mittelpunkt stand dabei der Betrieb der ertüchtigten seriellen Dieselhybridbusse, deren technische Betreuung und die Optimierung der Instandhaltung sowie der Abgleich mit den Linienparametern der HOCHBAHN im Hinblick auf eine Ausweitung des Einsatzes von Hybridbussen. Die Dieselhybridbusse wurden dafür im Liniendienst eingesetzt. Die wesentlichen Daten der genannten Aktivitäten wurden erhoben, analysiert und in konkrete Handlungskonzepte überführt. Entsprechende Maßnahmen zur öffent-

lichkeitswirksamen Kommunikation und Dokumentation leisteten einen Beitrag, die Akzeptanz und Etablierung dieser Technologie in der Bevölkerung und dem städtischen Alltag zu erreichen. Die geplanten Arbeitsinhalte des durchgeführten Projekts sind in Abbildung 1 dargestellt.

II.4 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Das vorliegende Projekt wurde durch die HOCHBAHN beantragt und durchgeführt werden. Alle betrieblichen Aufgabenstellungen wurden durch die entsprechenden Fachabteilungen der HOCHBAHN ausgeführt. Die FFG Fahrzeugwerkstätten Falkenried GmbH, die als hundertprozentige Tochter der HOCHBAHN entsprechend der im Konzern üblichen Arbeitsteilung die technische Betreuung der Dieselhybridbusse übernahm. Hinsichtlich der Optimierung und Weiterentwicklung der seriellen Dieselhybridbusse und ihrer Systeme wurde die bisherige erfolgreiche Zusammenarbeit mit dem Fahrzeughersteller EvoBus weiter fortgesetzt. Das Unternehmen war mittelbar in das Projekt eingebunden, stellte aber keinen eigenen Förderantrag für die erbrachten Leistungen, da diese bereits in anderen Förderprojekten abgebildet waren. Die hySOLUTIONS GmbH, ein Public-Private Partnership im mehrheitlichen Besitz der HOCHBAHN, realisierte strategische und administrative Aufgaben im Projekt. Hierzu zählte die fachliche Projektunterstützung der HOCHBAHN und die Vermittlung und Vorstellung des Projekts in der Öffentlichkeit. hySOLUTIONS koordinierte darüber hinaus die Abstimmung mit dem Zuwendungsgeber sowie die Integration des Projektes in die örtlichen Gesamtaktivitäten. Nachstehend werden die Projektbeteiligten mit ihren jeweiligen Rollen und Ansprechpartnern im Projekt ausgewiesen.

| | | | | |
|--|---------------------|--|----------------------|---|
| Hamburger Hochbahn AG | Antragsteller | hySOLUTIONS GmbH Steinstraße 25, 20095 Hamburg | Heinrich Klingenberg | Heinrich.Klingenberg@ hysolutions-hamburg.de |
| EvoBus GmbH | Mittelbarer Partner | EvoBus GmbH, Hans Martin Schleyer Str. 21, 68301 Mannheim | Markus Balke | Markus.Balke @daimler.com |
| FFG Fahrzeugwerkstätten Falkenried GmbH | Auftragnehmer | FFG Fahrzeugwerkstätten Falkenried GmbH, Lade- mannbogen 138, 22339 Hamburg | Olaf Lilla | Olaf.Lilla@ffg-hamburg.de |
| hySOLUTIONS GmbH | Auftragnehmer | hySOLUTIONS GmbH Steinstraße 25, 20095 Hamburg | Heinrich Klingenberg | Heinrich.Klingenberg@ hysolutions-hamburg.de |

Tabelle 1: Projektbeteiligte

Neben den aufgeführten Projektbeteiligten was die Forschungsgesellschaft Kraftfahrwesen Aachen (fka) als Auftragnehmer der HOCHBAHN eng in die Datenauswertung und –analyse in-

nerhalb des Vorhabens eingebunden mit dem Ziel, die im Fahrbetrieb erhobenen Daten ausgewählter Linien auf das gesamte Liniennetz der HOCHBAHN übertragen zu können. Die Zulieferung der Daten erfolgte in enger Zusammenarbeit und Abstimmung der HOCHBAHN, der FFG und hySOLUTIONS zusammen mit der fka. Die Erarbeitung dieser Ergebnisse ist in AP 1.3 detailliert dargestellt.

III Wissenschaftlich-technische Ergebnisse

III.1 Teilprojekt 1: Betrieb der Fahrzeuge und Evaluation der Erprobung bei der HOCHBAHN

III.1.1 Arbeitspaket 1.1: Betrieb der Fahrzeuge und Schulung der Fahrdienstmitarbeiter

Im Projekt befanden sich alle fünf seriellen Dieselhybridbusse des Herstellers EvoBus für die betrieblichen Bewertungen im täglichen Linieneinsatz. Die Busse sind auf dem Betriebshof Hummelsbüttel stationiert. Da sich dort die zentrale Hauptwerkstatt der HOCHBAHN-Tochterfirma FFG befindet, ergeben sich Vorteile in der direkten Betreuung der Dieselhybridbusse durch die Werkstatt und den Fahrdienst.

Einsatz der Fahrzeuge im Regelbetrieb

Ausgehend vom Betriebshof Hummelsbüttel verkehrten die Busse überwiegend auf der Stadtbus-Linie 109 (U Alsterdorf – Winterhude – Rotherbaum – Rathausmarkt – Hauptbahnhof).

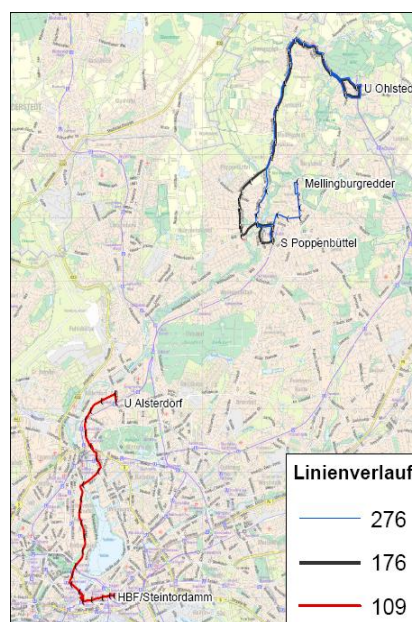


Abbildung 2: Linienverläufe

Die Durchschnittsgeschwindigkeit auf der StadtBus-Linie 109 beträgt im Mittel etwa 18,1 km/h. Dies entspricht tagsüber in etwa einem verdichteten Innenstadtkverkehr nach SORT I. Einzelne Fahrten werden als Schulverkehrsverstärker auf den StadtBus-Linien 176 (S Poppenbüttel – Duvenstedt) und 276 (Sasel – S Poppenbüttel – Duvenstedt – U Ohlstedt) durchgeführt. Die

Linien verbinden mehrere Stadtteile an der nördlichen Hamburger Landesgrenze. Auf den StadtBus-Linien 176 und 276 beträgt die Geschwindigkeit 28,8 bzw. 26,6 km/h. Die Umläufe der drei genannten Linien sind hierbei häufig liniengemischt, was bedeutet, dass zwischen dem Ein- und Aussetzen eines Fahrzeugs Nutzfahrten verschiedener Linien geleistet werden. Charakteristisch für die Umlaufbildung ist, dass in der Regel vor oder nach einem Umlauf auf der StadtBus-Linie 109 (in der Regel 7 – 9 Stunden Dauer) noch ein einzelnes Fahrtenpaar auf den StadtBus-Linien 176 oder 276 geleistet wird.

Aufgrund stark steigender Fahrgastnachfrage bedienen seit dem Frühsommer 2013 die Busse bedarfsweise auch die StadtBus-Linie 111. Der Liniencharakter entspricht einem SORT I-Einsatz und erfolgt vorzugsweise an den Wochentagen Freitag, Sonnabend und Sonntag ab mittags, da zu diesen Zeitpunkten besonders viele Touristen die Linie nutzen. Die StadtBus-Linie 111 verkehrt sehr öffentlichkeitswirksam vom Bahnhof Altona über den Hamburger Fischmarkt, Reeperbahn, Davidstraße zu den St. Pauli Landungsbrücken und weiter durch die HafenCity. Der Endpunkt befindet sich in die Nähe der kürzlich errichteten neuen HafenCity Universität. Sie erschließt damit den derzeit stadtentwicklungsmäßig bedeutendsten und dynamischsten Hamburger Stadtteil am Hafенrand und stellt neben der Erschließungsfunktion für Anwohner und Beschäftigte besonders für Touristen eine äußerst attraktive Sightseeing-Route dar. Auf dieser markanten Linie werden neben den Dieselhybridbussen in der Variante als Gelenkbus (18 m Fahrzeuglänge) vorzugsweise auch die bislang vier Brennstoffzellenhybridbusse der HOCHBAHN eingesetzt. Zwei weitere Busse in der Gelenkvariante mit einer Brennstoffzelle als Range-Extender und einer Batterie für den direkten Fahrtrieb sollen zum Ende des Jahres 2014 die bestehende Flotte erweitern.

Laufleistung

Die monatliche Kilometerleistung von etwa 27.600 km, die über 27 Monate im Projektzeitraum vom 01.10.2011 bis zum 31.12.2013 erzielt worden war, erreichte noch nicht an die eines konventionellen Dieselbusses heran.

| Wagennummer | km gesamt | km im Jahr 2013 |
|--------------------|------------------|------------------------|
| 7051 | 77.334 | 25.920 |
| 7052 | 84.766 | 21.167 |
| 7151 | 94.461 | 31.919 |
| 7152 | 84.870 | 27.778 |
| 7153 | 92.851 | 31.368 |

Tabelle 2: Laufleistung der fünf Dieselhybrid-Gelenkbusse gesamt und im Jahr 2013

Im Vergleich dazu lag die durchschnittliche Laufleistung der Gelenkbusse bei der HOCHBAHN im Jahr 2013 bei etwa 50.000 km. Somit erzielten die seriellen Dieselhybridbusse im vorliegen-

den Projekt nur etwas mehr als die Hälfte der Kilometerleistung der konventionellen Busse. Die im Vergleich geringe Laufleistung ist insbesondere auf die Verfügbarkeit der Hybridbusse von durchschnittlich 65% im Vorhabenszeitraum zu erklären (siehe AP 2.4).

Schulung der Fahrdienstmitarbeiter

Die Akzeptanz der Dieselhybridbusse bei den Busfahrerinnen und Busfahrern ist vor allem davon abhängig, dass sie die Technologie der Hybridbusse kennen und wissen, wie sie sich bei eventuellen Störungen zu verhalten haben. Dieses erfordert eine rechtzeitige und ausreichende Weiterbildung. Auch die Akzeptanz der Hybridbusse bei den Fahrgästen ist davon abhängig, inwieweit die Fahrdienstmitarbeiter deren Vorteile aktiv gegenüber den Fahrgästen und in der Öffentlichkeit kommunizieren. Daher wurden vor allem kommunikationsfreudige Mitarbeiter/innen ausgewählt und eingesetzt.

Die Einweisung in die serielle Hybridbustechik der fünf Gelenkbusse umfasst im Wesentlichen Schulungen im Umfang von sechs Stunden auf dem Betriebshof Hummelsbüttel inklusive einer Einweisungsfahrt durch speziell geschulte Mitarbeiter der HOCHBAHN.

Aufgrund der zunächst geringen Verfügbarkeit wurde von den ca. 330 Busfahrerinnen und Busfahrern des Betriebshofes zunächst nur rund 60 auf den Fahrzeugen eingewiesen. Diese ausgewählte Fahrerschaft hatte betrieblich den Vorteil, dass sie häufiger auf den Bussen eingesetzt wurde und mit manchen Fehlern und Fehlermeldungen der neuen Technik sachgerecht umgehen konnte. Gleichzeitig konnten diese „Expertenfahrer“ aufgrund der Erfahrung wertvolle Hinweise zu Störungsursachen geben. Aufgrund normaler Fluktuation (Kündigung/Rente/Versetzung auf andere Betriebshöfe) erfolgten bedarfsweise im Laufe des Versuchszeitraumes weitere Mitarbeiterschulungen um den ausgebildeten Mitarbeiterstamm bei ca. 60 Personen zu halten.

Wegen der Verstetigung der Verfügbarkeit wurde ab dem dritten Quartal 2013 begonnen deutlich mehr Fahrdienstmitarbeiter für den Einsatz auf den Dieselhybridbussen zu schulen. Es wird angestrebt bis zum Sommer 2014 alle etwa 330 Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter des Betriebshofes auf den Bussen einzuweisen. So brauchen zukünftig die Busse im Rahmen der Dienst- und Einsatzplanung nicht mehr gesondert disponiert werden.

III.1.2 Arbeitspaket 1.2: Datenerfassung und Evaluation der Betriebseinsätze

Ziel dieses Arbeitspaketes war es, anhand der Erprobung der Dieselhybridbusse und der begleitenden Betriebsdatenerfassung auf unterschiedlichen Linienprofilen, wesentliche Parameter zu identifizieren, die eine Abschätzung der Effektivität der Technologie aus energetischer Sicht ermöglichen. Zudem sollten Liniencharakteristika ausgewiesen werden können, die für einen besonders effizienten Einsatz der Hybridbusse im Liniennetz der HOCHBAHN förderlich sind. Es wurde erwartet, dass die Hybridtechnologie nur dann verbrauchseinsparend genutzt werden

kann, wenn auch die linien- und betriebsabhängigen Rahmenbedingungen passen. Insbesondere auf Strecken mit einer erhöhten Anzahl an verkehrsbedingten Halten auf der Strecke sollten sich die Vorteile serieller Hybridantriebe (geringe Geräusche, ruckfreies Fahren, schnellere und bessere Kraftübertragung des Busses) positiv auswirken und auch der Energieverbrauch signifikant reduziert werden können. Diese Grundannahme galt es im Rahmen des AP 1 zu evaluieren.

Ergänzend zu den fünf seriellen Dieselhybridfahrzeugen des vorliegenden Fördervorhabens wurde auch Hybridbusse in der Solobusvariante (12 m Fahrzeuglänge) mit paralleler Antriebsstrangauslegung für die Untersuchung zum Vergleich dieser zwei Technologieansätze herangezogen.

Vor diesem Hintergrund umfasste das AP 1.2 folgende Betrachtungsobjekte:

- Ermittlung der für die Beurteilung der Einsatzprofile notwendigen Planungsparameter
- Auswahl an geeigneten Linien für die praktische Durchführung umfangreicher Mess- und Vergleichsfahrten
- Datenaufbereitung und –zulieferung für die Simulation betrieblicher Einsatzstrategien inkl. Abstimmungs- und Steuerungsgespräche (AP 1.3)
- die Bewertung der daraus zu erwartenden Ergebnisse hinsichtlich der Projektziele

Für die Auswahl geeigneter Linien wurde ein mehrstufiger Abstimmungsprozess gewählt. Zunächst wurden die Fahrprofile und Streckencharakteristika sämtlicher Linien analysiert und nach den Kenngrößen nach drei Kategorien geclustert (gering, mittel, hoch):

- mittlerer Haltestellenabstand
- mittlere Fahrgeschwindigkeit zwischen zwei Haltestellen
- Anzahl an Halten außerhalb der Haltestellenbereiche

Die Klassengrenzen wurden anhand von Häufigkeitsverteilungen zu etwa gleichen Anteilen (jeweils 33%) festgelegt. Hierbei wurde das Busliniennetz der HOCHBAHN entsprechend der zur Verfügung stehenden Testfahrzeuge (serieller Dieselhybridbus in der Gelenkbusvariante von EvoBus, paralleler Dieselhybridbus in der Solobusvariante von Volvo) nach Bustypen differenziert. Die parallelen Hybridbusse werden seit 2011 innerhalb eines durch das BMUB geförderten Projektes bei den HOCHBAHN-Tochterunternehmen Jasper und SBG eingesetzt.

In der zweiten Stufe wurden die Linien innerhalb der Cluster hinsichtlich der Randbedingungen: Stationierung und Anzahl linienreiner Umläufe aus Sicht des Busbetriebs bewertet. Hierbei wurden die geplanten Stationierungen der Testfahrzeuge auf den Betriebshöfen Hummelsbüttel sowie Jasper und SBG berücksichtigt. Für die Bewertung der Einflussparameter wurde versucht, möglichst linienreine Umläufe zu identifizieren, um im Nachhinein einen Zusammenhang zwischen Streckencharakteristika, Nachfrage, Umweltparameter und den Verbrauchswerten darstellen zu können. In Abbildung 3 ist die Methode zur Auswahl der Linien dargestellt. Die

Schnittmenge aus verkehrlich interessanten und betrieblich sinnvollen Linien repräsentiert die nachfolgend dargestellte Auswahl an Einsatzprofilen.

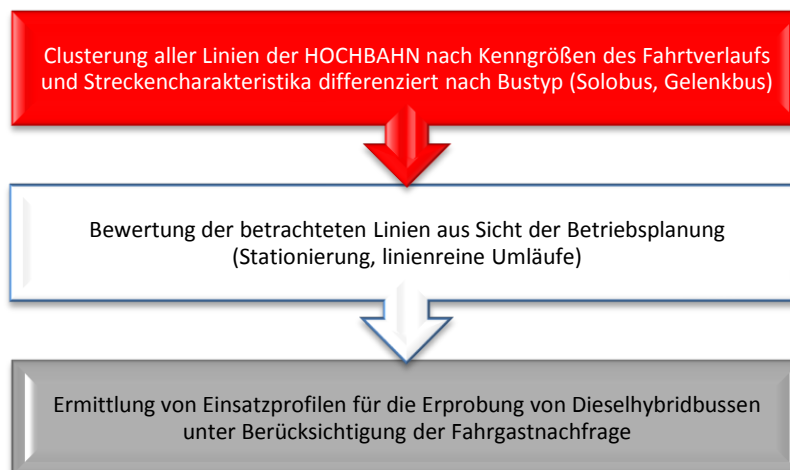


Abbildung 3: Empfehlungen für Einsatzprofile von Dieselhybridbussen - Methodik

Einsatzprofile (Gelenkbus)

Entsprechend der beschriebenen Methodik zur Linienauswahl bei den Gelenkbussen wurde der mittlere Haltestellenabstand über der mittleren Fahrgeschwindigkeit aufgetragen, wie in Abbildung 4 dargestellt. Die Anzahl der Halte auf der Strecke ist im Diagramm durch die Größe der Bubbles ersichtlich. Die Klassengrenzen für die Kenngrößen mittlerer Haltestellenabstand liegen bei 460 m und 560 m, für die mittlere Fahrgeschwindigkeit bei 25,5 km/h und 29 km/h. Diese sind als gestrichelte Linien im Diagramm eingetragen. Die Auswahl der Linien erfolgte mit dem Ziel, ein möglichst breites Spektrum an Einsatzprofilen abdecken zu können. Die ausgewählten Linien sind im Diagramm in rot dargestellt und verteilen sich über die definierten Klassenbereiche.



Abbildung 4: Clusterung der Gelenkbus-Linien nach mittlerer Fahrgeschwindigkeit, mittlerem Haltestellenabstand und Anzahl Halte auf der Strecke (Größe der Bubbles)

Neben den für den Stadtverkehr repräsentativen Linien 4, 6, 14 und 25 stellt die Eilbuslinie E86 mit Haltestellenabständen von über 5,6 km eine Besonderheit hinsichtlich der Streckencharakteristik dar. Diese Linie wurde bewusst in das Messprogramm einbezogen, um auch bei diesen extremen Randbedingungen eine Bewertung der Dieselhybridbusse vornehmen zu können.

| | | Cluster | |
|-------|-------------|----------------------------------|-----------------------------------|
| Linie | | Mittlere Fahrgeschwindigkeit [-] | Mittlerer Haltestellenabstand [-] |
| 1 | MetroBus 4 | gering | mittel |
| 2 | MetroBus 6 | gering | gering |
| 3 | MetroBus 14 | mittel | mittel |
| 4 | MetroBus 25 | gering | mittel |
| 5 | EilBus 86 | hoch | hoch |

Tabelle 3: Übersicht der gewählten Einsatzprofile für Gelenkbusse und deren Cluster

In Abbildung 5 ist der Verlauf der ausgewählten Linien im Hamburger Stadtgebiet kartographisch dargestellt.

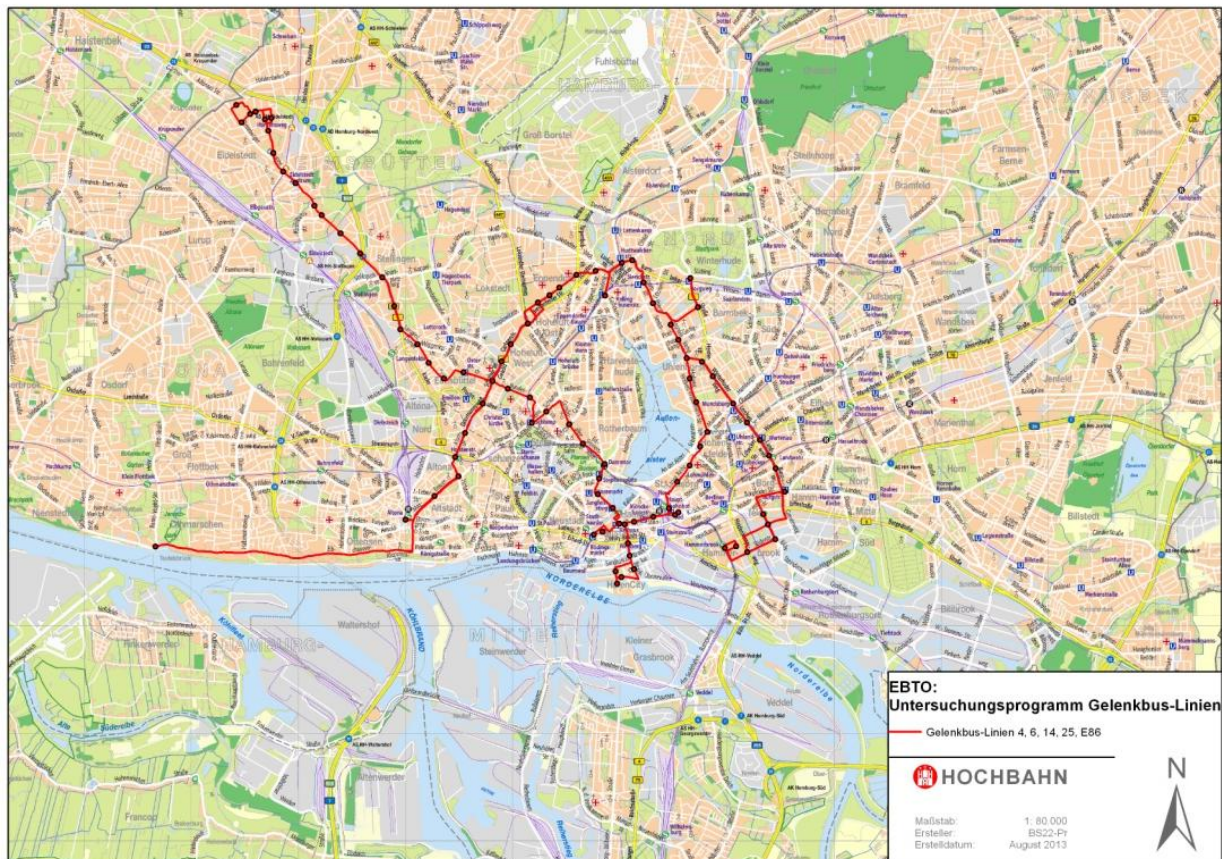


Abbildung 5: Übersichtskarte der untersuchten Gelenkbus-Linien

Einsatzprofile (Solobus)

Die Auswahl der Einsatzprofile für die Solobusse erfolgt nach dem gleichen Schema. Die Auftragung der Kenngröße mittlerer Haltestellenabstand über der mittleren Fahrgeschwindigkeit ist in Abbildung 6 dargestellt. Die Anzahl der Halte auf der Strecke ist auch hier durch die Größe der Bubbles ersichtlich. Die gestrichelt dargestellten Klassengrenzen für die Kenngrößen mittlerer Haltestellenabstand liegen wie bei der Clusterung der Gelenkbusse bei 460 m und 560 m. Für die mittlere Fahrgeschwindigkeit ergeben sich Klassengrenzen bei 25,5 km/h und 27,5 km/h. Die in Abbildung 6 rot dargestellten Linien wurden auch bei den Solobussen nach dem Kriterium der möglichst großen Repräsentativität ausgewählt.



Abbildung 6: Clustering der Solobus-Linien nach mittlerer Fahrgeschwindigkeit, mittlerem Haltestellenabstand und Anzahl Halte auf der Strecke (Größe der Bubbles)

Es zeigt sich eine breite Verteilung der ausgewählten Linien über alle Klassengrenzen, so dass alle Cluster entsprechend innerhalb des Messprogramms berücksichtigt werden.

| | | Cluster | |
|-------|---------------|----------------------------------|-----------------------------------|
| Linie | | Mittlere Fahrgeschwindigkeit [-] | Mittlerer Haltestellenabstand [-] |
| 1 | MetroBus 24 | hoch | mittel |
| 2 | SchnellBus 39 | mittel | hoch |
| 3 | StadtBus 150 | hoch | hoch |
| 4 | StadtBus 170 | gering | gering |
| 5 | StadtBus 250 | hoch | mittel |
| 6 | StadtBus 270 | gering | mittel |

Tabelle 4: Übersicht der gewählten Einsatzprofile für Solobusse und deren Cluster

Abbildung 7 zeigt den Verlauf der ausgewählten Linien im Hamburger Stadtgebiet. Eine Besonderheit stellt der Anteil einer Fahrstrecke auf der Autobahn der Linie 150 dar. Im Durchschnitt ergibt sich für die Linie mit etwa 29 km/h zwar eine hohe aber nicht signifikante Fahrgeschwindigkeit. Die Linien 170 und 270 verkehren auf dem Ohlsdorfer Friedhof und unterliegen einer Höchstgeschwindigkeit vom 30 km/h. Insgesamt zeigt sich die Linienauswahl breit verteilt und ist somit repräsentativ für das Liniennetz der HOCHBAHN.

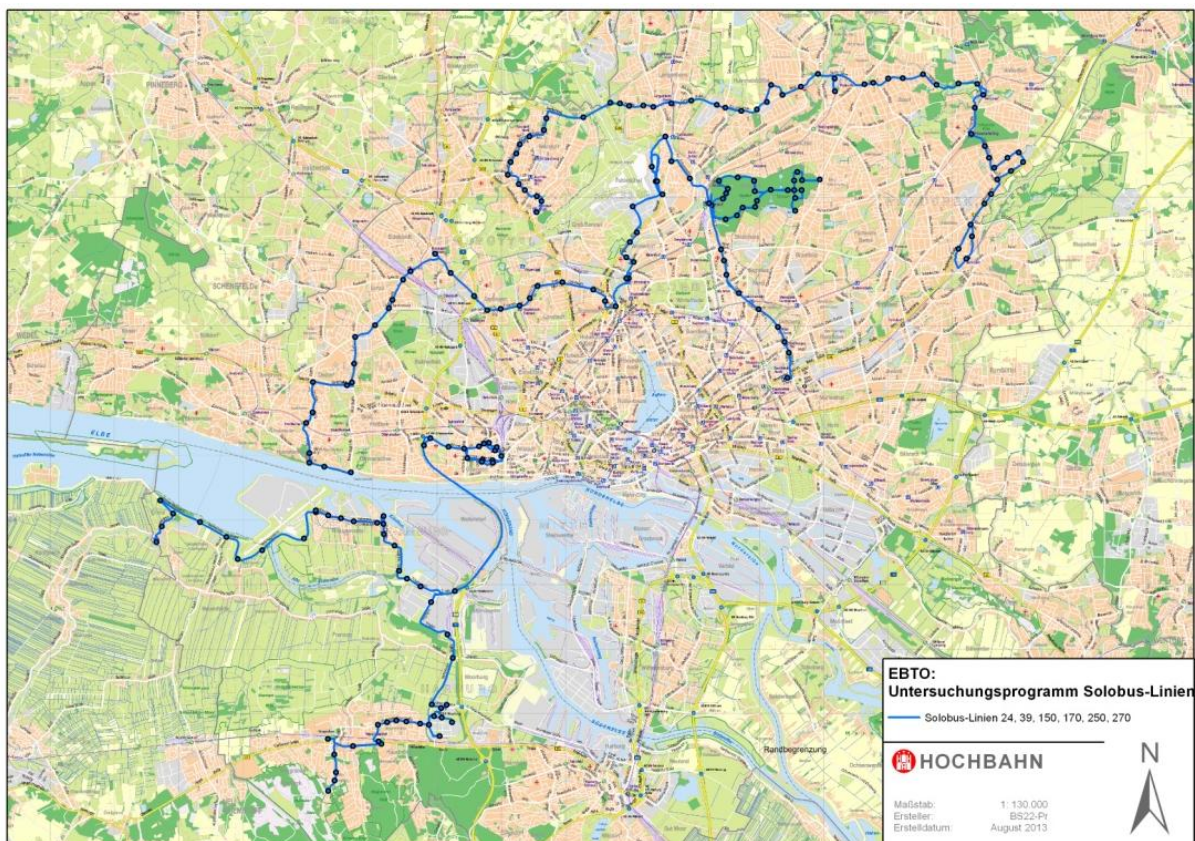


Abbildung 7: Übersichtskarte der untersuchten Solobus-Linien

Projektdurchführung des Messfahrtenprogramms

Für die Beurteilung der Sensitivität des Kraftstoffverbrauchs auf verschiedene Planungsparameter wurden im Rahmen der Messfahrten auf den gewählten Linien folgende Kenngrößen betrachtet und protokolliert.

- **Nachfrageerfassung:** Für die Erfassung der Fahrgastnachfrage wurden automatische Fahrgastzählensysteme in den fünf Testfahrzeugen sowie einer entsprechenden Anzahl Referenzfahrzeuge installiert, um einen ausreichenden Detaillierungsgrad erreichen zu können.
- **Tankdaten:** Die Erfassung von Tankdaten für die Dieselhybridfahrzeuge sowie Referenzfahrzeuge mit konventionellem Antrieb wird permanent gewährleistet. Hierzu kann auf meh-

renen Betriebshöfen auf die vorhandene automatische Tankdatenerfassung zurückgegriffen werden. Aufgrund der technischen Komplexität und der hohen Investitionskosten wurde nach detaillierter Prüfung und Gesprächen mit entsprechenden Anbietern auf den Einbau von Systemen zur Durchflussmessung verzichtet. Um dennoch eine ausreichende statistische Sicherheit bei der Tankdatenerfassung zu erreichen, erfolgt der Messeinsatz der Hybrid- und Referenzfahrzeuge über einen Zeitraum von fünf Wochen auf jeder der obengenannten Linien. Dazu wurden entsprechende linienreine Umläufe ausgewählt. Die Erhebung der Tankdaten bedingt eine Aggregation aller erfassten Parameter zu Tagesdurchschnittswerten. Die generierten Tagesdurchschnittswerte werden zur Erstellung und Verifizierung des Simulationsmodells im Weiteren verwendet.

- **Fahrtverlaufsdaten:**
 - Datum (Tagesart, Ferien [ja/nein])
 - Informationen zum Einsatzprofil:
 - Linie(n) [-]
 - Linienlänge [km]
 - Anzahl Haltestellen [-]
 - mittlerer Haltestellenabstand [m]
 - Mittlere Reisegeschwindigkeit [km/h]
 - Mittlere Fahrgeschwindigkeit außerhalb von Haltestellen [km/h]
 - Mittlere Anzahl Halte außerhalb von Haltestellen [-]
 - Mittlere Haltedauer außerhalb von Haltestelle [s]
 - Mittlere Türöffnungsdauer in der Haltestelle [s]
 - Mittlere Anzahl Halte pro Linien-km [1/km]
 - Informationen zur Fahrzeugcharakteristika:
 - Hersteller [-]
 - Baujahr [-]
 - Gefäßgröße [Standardbus, Gelenkbus]
 - Kapazität [Summe Sitz- und Stehplätze]
 - Motorisierung [kW]
 - Antriebsart [Diesel, serieller Dieselhybrid]
 - Informationen zur Energieeffizienz:
 - Kilometerleistung [km]

- Kraftstoffverbrauch [l]
- Informationen zur Fahrgastnachfrage¹:
 - Mittlerer Auslastungsgrad [%]
- Weitere Informationen:
 - Mittlere Tagestemperatur [°C]
 - Grobe Informationen über die Topographie
 - Grobe Informationen über die Witterung

Der Messfahreneinsatz erfolgte aufgrund der Einsatznähe zu den ausgewählten Messlinien u.a. neben dem Betriebshof Hummelsbüttel auch auf den Betriebshöfen Harburg, Langenfelde und Mesterkamp. Die dortigen Mitarbeiter im Fahrdienst wie in der Werkstatt waren bis zu dem Zeitpunkt nicht mit diesen Hybridbussen vertraut. Zur Vorbereitung des Einsatzes wurden ausgewählte Busfahrer sowie feste örtliche Ansprechpartner im Betrieb, in der Werkstatt und in der nächtlichen Reinigung/Betankung benannt und geschult. Entsprechend der Vorgaben für den Messeinsatz (siehe AP 1.2) wurde ihnen das Einsatzkonzept vermittelt sowie Rückfall- und Verhaltensanweisungen bei Störungen abgesprochen. Gleichzeitig fand auch eine Begehung der Betriebshofanlagen hinsichtlich Durchfahrtshöhen, Versorgungsmöglichkeiten, Abstellsituation etc. der Busse statt. Die Dieselhybrid- wie auch die Referenzbusse mussten in der Regel besonders abgestellt werden, damit sie ungehindert von der üblichen Reihenaufstellung gezielt auf die ausgewählten linienreinen (Messfahrten-) Umläufe geschickt werden konnten.

Viele Umsteigeanlagen zwischen Bus und Schnellbahn stammen überwiegend aus den 60er- und 70er Jahren des letzten Jahrhunderts. Bei mehreren Anlagen mussten aufgrund der Fahrzeughöhen der Dieselhybridbusse die Dachkonstruktion angepasst werden. So wurden bei mehreren Busanlagen (beispielsweise Bf. Altona, U Billstedt, U Wandsbek Markt, S Wilhelmsburg) Dachbereiche gekürzt oder neugebaut und abgehängte Einbauten (Leuchten und Infoeinrichtungen) versetzt.

Die jeweils fünföchigen Messfahrten fanden von Montag bis Freitag auf linienreinen Umläufen statt, was bedeutet, dass zwischen dem Ein- und Aussetzen eines Fahrzeugs Nutzfahrten nur einer Linie (der Messlinie) geleistet wurden. Je Linie wurden zwei dieser Umläufe gewählt auf denen – im täglichen Wechsel – jeweils ein Hybridbus und ein konventionelles Referenzfahrzeug eingesetzt wurden. Nur eingewiesene Fahrpersonale haben die Messfahrten durchgeführt, um fahrerbedingte Messunsicherheiten möglichst zu minimieren.

Start war ab dem 5. November 2012 mit dem Messeinsatz auf der MetroBus-Linie 14 (Eißendorf – Bf. Harburg – Fleestedt). Diese Linie bedient ausschließlich der Betriebshof Harburg im Hamburger Süden mit seinen Fahrzeugen. Für den Messbetrieb wurden 10 Fahrdienstmitarbeiter des Betriebshofes auf dem Fahrzeug geschult. Entsprechend der oben genannten Einsatzvor-

¹ Quelle: Automatische Fahrgastzählssysteme

gaben (siehe auch AP 1.2 Vorgaben für den Messeinsatz) erfolgte von montags bis freitags jeweils ein Einsatz mit zwei Diensten (Mitarbeiter) pro Fahrzeugumlauf (Fahrzeugeinsatzdauer ca. 15 bzw. 16 Stunden).

Anschließend wurde im Jahr 2013 auf zwei weiteren Betriebshöfen das Messfahrtenprogramm für die seriellen Dieselhybridbusse fortgeführt:

Ausgehend vom Betriebshof Mesterkamp wurden über jeweils fünf Wochen die MetroBus-Linie 6 (U Borgweg – Hauptbahnhof – Speicherstadt/HafenCity) und die MetroBus-Linie 25 (Bf. Altona – Eppendorf – Winterhude – Hammerbrook/City Süd) bedient.

Der Betriebshof Langenfelde setzte die Busse ausschließlich auf der MetroBus-Linie 4 (Hauptbahnhof – Rathausmarkt - Eimsbüttel – Eidelstedt) sowie der schnelllaufenden EilBus-Linie E86 (Bf. Altona – Anleger Teufelsbrück) ein. Die EilBus-Linie E86 verfügt über keine Zwischenhaltestellen und dient schwerpunktmäßig als Shuttle für die Mitarbeiter des Hamburger Airbus-Werkes zu den dortigen Arbeitszeiten. Die fahrplanmäßige Fahrzeit zwischen den beiden Endpunkten beträgt nur 11 Minuten. Entgegen der Lastrichtung finden häufig Leerfahrten statt.

Die nachfolgende Tabelle zeigt die Messlinien und –zeiträume sowie zugehörige Betriebshöfe der seriellen EvoBus-Dieselhybridgelenkbusse:

| Linie | Messzeitraum | Betriebshof |
|-------|-------------------------|-------------|
| 4 | 14.01.2013 - 15.02.2013 | Langenfelde |
| 6 | 21.01.2013 - 22.02.2013 | Mesterkamp |
| 14 | 05.11.2012 - 07.12.2012 | Harburg |
| 25 | 25.02.2013 - 29.03.2013 | Mesterkamp |
| E86 | 14.02.2013 - 19.03.2013 | Langenfelde |

Tabelle 5: Messlinien und -zeiträume nach Betriebshof

Die fünf Dieselhybridgelenkbusse werden im Jahr 2014 weiter schwerpunktmäßig auf der StadtBus-Linie 109 eingesetzt. Ab Dezember 2014 wird diese Linie zur Innovationslinie der HOCHBAHN, d.h. es sollen ausschließlich Busse mit innovativen Antriebstechniken zum Einsatz kommen. Die Vorbereitungen für die Einsatzplanung laufen bereits. Die fünf Busse bilden den Grundstock des Einsatzbestandes, der durch weitere Dieselhybrid-, Plug-In- sowie Brennstoffzellenbusse ergänzt wird.

III.1.3 Arbeitspaket 1.3: Ableitung und Priorisierung künftig Einsatzprofile

Für den kraftstoffeffizienten Einsatz von Dieselhybridbussen im Linienverkehr der HOCHBAHN hat die fka ein Programm zur Verbrauchsprognose für zwei Fahrzeugvarianten erstellt. Neben

den im vorliegenden Projekt eingesetzten seriellen Dieselhybridbussen von EvoBus werden auch, wie bereits in AP 1.2 erwähnt, parallele Dieselhybridbusse des Herstellers VOLVO berücksichtigt.


Mit der Erstellung dieses Simulationstools zur Verbrauchsprognose wurde eine konsequente Auswertung der in AP 1.2 ermittelten Daten verfolgt. Es war dabei das Ziel, die linien- und streckenbezogene Effekte beim Einsatz von Hybridbussen mit seriell und parallel angetriebenem Antrieb zu ermitteln und die konkreten Einsparpotentiale im Liniennetz der HOCHBAHN zu identifizieren. Im nächsten Schritt können diese Informationen dann für die künftige Auslegung von Umläufen mit Hybridbussen genutzt werden, um möglichst große Kraftstoffreduzierungen im betrieblichen Einsatz zu erzielen. Zur Unterstützung wurde daher das fka mit der Ausarbeitung eines entsprechenden Verbrauchsprognosetools beauftragt.

Durch die Auswahl der Buslinie kann im Prognosetool ein direkter Vergleich der Kraftstoffverbräuche von seriellen und parallelen Hybridbussen im Abgleich zu konventionell angetriebenen Fahrzeugen auf allen Linien der HOCHBAHN durchgeführt werden. Die Auswertung innerhalb des Programms berücksichtigt signifikante Linienparameter, wie z.B. Haltestellenabstände, Linienstreckenlängen, Auslastungen, Haltezeiten auf der Strecke (Verkehrseinfluss) und an der Haltestelle, entsprechend der aufgeführten Betriebsdaten in AP 1.2. In Zusammenarbeit mit der HOCHBAHN sind aus der Untersuchung charakteristische Daten für jede Buslinie abgeleitet worden. Diese Daten dienen als Eingangsdaten für die nachfolgende Simulation. Ziel der Simulation ist es, die Ergebnisse der ausgewählten Linien auf das gesamte Liniennetz der HOCHBAHN zu übertragen. In Abbildung 8 sind die relevanten Linienparameter auf der rechten Seite aufgelistet.


Die Verwendung von realen Fahrdaten ist für die Verbrauchssimulation nur bedingt geeignet. Aufgezeichnete Fahrdaten obliegen einem starken Einfluss durch den Fahrer und den umgebenden Verkehr. Ferner ist eine Parametrisierung dieser Fahrdaten nicht ohne gezielte und umfangreiche Aufarbeitung der Messdaten möglich. Die HOCHBAHN hat vor diesem Hintergrund die Anzahl der verschiedenen Fahrer im Rahmen der Erhebungsfahrten minimiert. Um dennoch die Komplexität einer jeden Buslinie für die Simulation zu reduzieren und die Möglichkeit einer Parametrierung einzubinden, ist ein Ansatz für die Synthetisierung der Linienverläufe entwickelt worden. Dieser sieht vor, mit Hilfe der charakteristischen Liniendaten (Abstand Haltestellen, Auslastung, etc.) für jede Buslinie einen für die Simulation gleichwertigen synthetischen Fahrzyklus zu erstellen.

In einem ersten Schritt sind fahrdynamische Simulationen des Busantriebsstrangs mit dem Programm „Matlab/Simulink“ durchgeführt worden. Dazu wurden Simulationsmodelle für die drei Fahrzeugtypen (paralleler und serieller Dieselhybridbus sowie konventioneller Dieselbus als Referenz) aufgebaut und die jeweiligen Fahrzeugdaten im Simulationsansatz integriert. Im Anschluss wurden Simulationsläufe der Fahrzeugtypen über ein mit der HOCHBAHN zusammen definiertes Parametrierungsfenster durchgeführt und ausgewertet. Dieser Datensatz diente der mathematischen Analyse der Zusammenhänge zwischen den Zyklenparametern und dem

Kraftstoffverbrauch. Nach Prüfung der Ergebnisse ergab sich eine Abweichung zwischen den betrieblichen Erfahrungen und den errechneten Werten hinsichtlich der Kraftstoffverbräuche. Über die Einführung von sog. repräsentativen Zyklen und erneuter Simulation konnte eine größere Genauigkeit der Ergebnisse im Vergleich zu den durchgeführten Messfahrten erzielt werden.



HOCHBAHN



Parametertool zur Bestimmung der Kraftstoffverbräuche im Linieneinsatz

Kraftstoffverbrauch:

| | Verbrauch [l/100km] | Einsparung [%] | Wirkungsgrad [%] | Fahrzeugtyp [-] |
|-------------------|------------------------|-------------------|---------------------|--------------------|
| konventionell | 45,0 | - | 38,0% | SoloBus |
| paralleler Hybrid | 32,3 | -28,2% | 53,0% | SoloBus |
| konventionell | 65,0 | - | 34,9% | Gelenkbus |
| serieller Hybrid | 43,0 | -33,9% | 52,8% | Gelenkbus |

Liniendaten:

- Streckenlänge: 8,2
- Auslastung: 13,0%
- Ø-Haltezeit (Strecke): 33,0
- Ø-Haltezeit (Haltestelle): 24
- Ø-Türöffnungsdauer: 12
- Haltestellenabstand: 433
- Reisegeschwindigkeit: 24,1
- Fahrgeschwindigkeit zwischen Haltestellen: 29,4
- Anzahl Halte (inkl. Haltestellen) pro Linien-km: 3,2
- Anzahl Halte zwischen zwei Haltestellen: 0,3
- Topografie: Flach
- primärer Fahrzeugtyp: SoloBus
- Kapazität: 70
- Summe Pers/Fahrt: 27,7
- mittlere Anzahl Pers/Fahrt: 9

Linie auswählen:

Linie: 156

Abbildung 8: Hauptmaske des Verbrauchsprognosetools

Mit Hilfe der Ergebnisse ist ein excelbasiertes Tool aufgebaut worden, das eine Abschätzung des Kraftstoffverbrauchs für einen wählbaren Fahrzeugtyp (serieller & paralleler Dieselhybrid, konventioneller Diesel) auf einer wählbaren Buslinie ermöglicht. Hierdurch lassen sich schließlich Erkenntnisse für den Einsatz von Hybridbussen im Liniennetz der HOCHBAHN gewinnen unter Berücksichtigung der Kraftstoffeinsparungen, die in die konkrete Einsatzplanung wie auch in die strategische Linienplanung und die technische Weiterentwicklung der Dieselhybridbusse gleichermaßen einfließen sollen.

Ergebnisse des Verbrauchstools

Der typische mittlere Kraftstoffverbrauch eines Busses ist im Wesentlichen von der spezifischen Linieneigenschaft abhängig. Das fka hat z.B. für einen konventionellen Solobus je nach Linie einen mittleren Dieserverbrauch zwischen 32,7 und 50,1 l/100 km ermittelt. Ein Gelenkbus verbraucht aufgrund seiner größeren Masse entsprechend mehr, hier liegt der mittlere Verbrauch zwischen 47,2 und 66,3 l/100 km.

Beim Einsatz von seriellen oder parallelen Hybridantrieben sinkt das Kraftstoffverbrauchs-niveau generell, auf keiner Linie steigt der Dieserverbrauch im Vergleich zu konventionell angetriebenen Bussen.

nen Fahrzeugen. Die ermittelten Einsparwerte sind nicht linear, sondern schwanken stark: Bei der Parallelhybridtechnik beträgt die Einsparung je Linie zwischen 19 und 41 %, bei der seriellen Technik zwischen 5 und 20 %.

Die durch das fka simulierten mittleren Kraftstoffverbräuche je Linie schwanken zwischen 22,9 und 37,4 l/100 km bei dem Einsatz von Parallelhybrid-Solobussen und 43,1 bis 60,7 l/100 km bei dem Einsatz von Gelenkbussen mit serielltem Hybrid.

Um das größtmögliche Wirkungspotenzial der zwei unterschiedlichen Hybridtechniken zu nutzen, muss ein Einsatz dieser Fahrzeuge bevorzugt auf den Linien erfolgen, die aufgrund ihrer spezifischen Liniencharakteristik möglichst hohe Kraftstoffeinsparungen ermöglichen. Zur Ermittlung der besonders erfolgsversprechenden Faktoren, werden die in dieser Untersuchung berücksichtigten HOCHBAHN-Buslinien nach folgenden Kriterien geclustert:

- Reisegeschwindigkeit und zulässige Höchstgeschwindigkeit,
- Anteil an Warte- und Verlustzeiten durch Lichtsignalanlagen, Stau, usw.,
- Haltestellenabstände,
- Fahrgastnachfrage und Fahrgastwechselaufkommen an Haltestellen,
- Streckentopographie (Steigungen).

Obwohl die Simulation des fka je Hybridtechnik nur einen Fahrzeugtyp berücksichtigt (serieller Hybridbus als Gelenkbus, paralleler Hybridbus als Solobus), werden für beide Antriebstechniken jeweils alle 91 simulierten Buslinien der HOCHBAHN berücksichtigt. So ist zwar der absolute Verbrauch zwischen beiden Hybridtechniken nicht vergleichbar, wohl aber das Einsparpotenzial je Linie.

Die betrachteten Buslinien können nach den oben genannten Kriterien in 10 Cluster eingeteilt werden:

Cluster Innenstadt: Linien durchlaufen oder tangieren die Innenstadt, die Reisegeschwindigkeit ist gering, es gibt viele Warte- und Verlustzeiten. Die Nachfrage ist gleichbleibend hoch, der Anteil an Haltestellen mit einem starken Fahrgastwechsel mit entsprechend langen Fahrgastwechselzeiten ist hoch. In dieser Gruppe sind 6 Linien vertreten, z.B. die Linien 5, 6 und 109.

Cluster Langer Haltestellenabstand: Linien beinhalten einen längeren Abschnitt, der schnell und ohne Halt durchfahren wird. Entsprechend hoch sind Reisegeschwindigkeit und maximale Geschwindigkeit. Warte-, Verlust- und Fahrgastwechselzeiten sind eher unterdurchschnittlich. In dieser Gruppe sind ebenfalls 6 Linien vertreten, darunter die Elbtunnel-Linien 150 und 250 sowie z.B. die 251 oder E86.

Cluster Schnellbus: Beinhaltet alle 5 Schnellbuslinien. Diese Linien haben eine sehr hohe Linienlänge und durchqueren überwiegend als Durchmesserlinien das gesamte Stadtgebiet. Reisegeschwindigkeiten, Warte- und Verlustzeiten sind durchschnittlich, die Nachfrage eher unterdurchschnittlich.

Cluster Stadtrand: In dieser Gruppe befinden sich Linien, die in bereits aufgelockerter Bebauung eine örtliche Erschließungsfunktion bzw. eine Zubringerfunktion zur nächstgelegenen Schnellbahnhaltestelle haben. Hohe Warte- und Verlustzeiten sowie Nachfragespitzen treten nur punktuell auf. Aufgrund der klaren fahrtrichtungsbezogenen Trennung der Zu- oder Abbringerfunktion zum Schnellbahnnetz sind die Fahrgastwechselzeiten auch bei höherer Nachfrage vergleichsweise gering. Mit 30 Linien ist dieses Cluster das umfangreichste und beinhaltet Linien wie die 262, 176 oder 292.

Cluster Tangente Außenraum: Diese Gruppe umfasst Buslinien im äußeren Stadtgebiet, die neben der reinen Erschließung auch eine zusätzliche überörtliche tangentielle Verbindungsfunktion besitzen. Die Fahrgastwechselzeiten fallen aufgrund der Verknüpfung unterschiedlicher Schnellbahnhaltestellen ebenso wie die Warte- und Verlustzeiten im Vergleich zum Cluster Stadtrand höher aus. In diesem Cluster gibt es mit den Linien 24, 26, 27 und 174 insgesamt vier Linien.

Cluster Tangente Innenraum: Beinhaltet alle drei tangentialen Metrobus-Linien (20, 23, 25), die im inneren Stadtgebiet tangentielle Verbindungen sicherstellen. Die Reisegeschwindigkeit ist gering, aufgrund der Querung vieler radialer Verkehrsachsen gibt es viele Warte- und Verlustzeiten. Die Nachfrage ist gleichbleibend hoch, der Anteil an Haltestellen mit einem starken Fahrgastwechsel mit entsprechend langen Fahrgastwechselzeiten ist hoch.

Cluster Tempo 30 Anteil: Dieses Cluster berücksichtigt Buslinien, deren Linienweg überproportional durch verkehrsberuhigte Nebenstraßen führt. Entsprechend gering ist die Reisegeschwindigkeit, obwohl Warte- und Verlustzeiten nur gering sind. Die Fahrgastnachfrage ist auf diesen Linien im Allgemeinen gering. Sechs Linien, z.B. 355, 170 und 375 sind in diesem Cluster vertreten.

Cluster Verdichtetes Stadtgebiet: In dieser Gruppe befinden sich Linien, die in stärker verdichteten Stadtgebieten entweder eine örtliche Erschließungsfunktion bzw. eine Zubringerfunktion zur nächstgelegenen Schnellbahnhaltestelle oder eine Verbindungsfunktion zwischen Schnellbahn-Linien haben. Höhere Warte- und Verlustzeiten treten regelmäßig und flächendeckend auf. Die Fahrgastnachfrage und damit auch die Fahrgastwechselzeiten sind auf längeren Linienabschnitten hoch. In diesem Cluster gibt es 17 Linien, dazu gehören die Linien 261, 172 und 283.

Cluster Gewerbegebiet: Dieses Cluster berücksichtigt Buslinien, deren Linienweg überproportional durch Gewerbe- oder Hafengebiete verläuft. Die Reisegeschwindigkeit ist relativ hoch, Warte- und Verlustzeiten treten nur punktuell in der Hauptverkehrszeit auf. Die Fahrgastnachfrage ist bis auf kurze Nachfragespitzen im Berufsverkehr auf diesen Linien im Allgemeinen gering. Zehn Linien, z.B. 152, 160, 180 sind in diesem Cluster vertreten.

Cluster Hügelig: Beinhaltet vier Linien (14, 142, 443, 144) im Harburger Raum, deren Streckenprofile für die Region ausgeprägte Höhenunterschiede aufweisen.

Im ersten Untersuchungsschritt werden die Cluster hinsichtlich der Wirksamkeit der Hybridtechnik verglichen. Ziel dabei ist es, die Liniencluster zu identifizieren, die eine signifikante Verbrauchsreduktion beim Einsatz von Hybridbussen aufweisen. Dieser generellen Darstellung der bevorzugten Leistungsprofile folgt anschließend eine Übertragung auf das tatsächliche Einsatzspektrum der HOCHBAHN-Betriebshöfe in Hamburg.

Auswertung der Cluster-Ergebnisse

Die Wirksamkeit der Hybrid-Technologie auf die einzelnen Cluster wird anhand der mittleren Platzierung des jeweils durch das Cluster repräsentierten Linienbündels dargestellt. Hierzu sind – getrennt nach parallelem und seriellen Hybrid – sämtliche 91 Linien entsprechend ihrer prozentualen Einsparung sortiert.

Für jedes Cluster wird anschließend der Mittelwert der Platzierungen aller in dieser Gruppe vertretenen Linien berechnet. Tabelle 6 zeigt das Ergebnis für die Parallelhybridtechnik an, als zusätzliche Informationen sind noch die besten und schlechtesten Platzierungen des Clusters angegeben, um die Varianz der Platzierungen innerhalb eines Clusters auszuweisen. Die meisten Cluster sind in sich homogen, d.h. die Platzierungen der einzelnen Linien liegen relativ eng beieinander. In Tabelle 6 sind die Cluster nach Platzierung sortiert aufgelistet.

| <u>Paralleler Hybrid</u> Gruppen | Platzierung | | | Kraftstoffverbrauch (Solobus) [l/100km] | | | |
|-------------------------------------|-------------|-------|--------------|---|--------------------------|------------|---------|
| | Mittelwert | Beste | Schlechteste | Konv. | <u>Paralleler Hybrid</u> | Einsparung | |
| | | | | | | absolut | relativ |
| Tempo 30 Anteil | 11,7 | 2 | 26 | 41,3 | 29,9 | -11,4 | -27,9% |
| Innenstadt | 17,0 | 5 | 25 | 41,2 | 31,0 | -10,2 | -24,6% |
| Hügelig | 17,3 | 4 | 34 | 43,4 | 32,4 | -11,0 | -25,2% |
| Tangente Innenraum | 19,3 | 10 | 37 | 41,6 | 31,5 | -10,1 | -24,3% |
| Verdichtetes Stadtgebiet | 28,4 | 7 | 55 | 41,2 | 31,9 | -9,3 | -22,5% |
| Schnellbus | 49,4 | 28 | 73 | 39,4 | 31,6 | -7,8 | -19,8% |
| Gewerbegebiet | 56,2 | 1 | 84 | 40,7 | 32,2 | -8,5 | -20,3% |
| Tangente Außenraum | 60,0 | 48 | 69 | 40,1 | 32,6 | -7,5 | -18,6% |
| Stadtrand | 63,5 | 27 | 91 | 40,5 | 33,4 | -7,0 | -17,4% |
| Langer Hst.abstand | 74,8 | 63 | 86 | 40,9 | 34,2 | -6,7 | -16,3% |

Tabelle 6: Auswertung paralleler Hybrid

Des Weiteren sind die mittleren Kraftstoffverbräuche für den konventionellen Dieselbus und den parallelen Dieselhybridbus sowie die absoluten und relativen Kraftstoffeinsparungen angegeben. Bei der Wirksamkeit des parallelen Hybridbusses gibt es zwischen den Clustern sehr deut-

liche Unterschiede. Die relativen Einsparungen fallen mit -27,9% im besten und -16,3% in schlechtesten Fall aus.

Das höchste Einsparpotenzial mit mehr als 24% Kraftstoffreduktion wird in den Gruppen „Tempo 30 Anteil“, „Innenstadt“, „Hügelig“ und „Tangente Innenraum“ erreicht. Als gemeine Einflussfaktoren weisen diese Cluster eine geringe Reisegeschwindigkeit, häufige Geschwindigkeitswechsel verbunden mit hohen Verlust- und Wartezeiten sowie eine hohe Fahrgastnachfrage mit entsprechenden Haltestellenaufenthaltszeiten auf. Diese Faktoren scheinen demnach maßgebend für einen effizienten Betrieb von Fahrzeugen mit Parallelhybrid zu sein. Zusätzlich kann diese Hybridtechnik auf steigungsreichen Strecken den Kraftstoffverbrauch effektiv verringern. Eine geringe Wirksamkeit hat der Parallelhybrid hingegen in den Clustern mit hoher Reisegeschwindigkeit und verhältnismäßig wenigen Halten. Die Auswertung verifiziert somit die Erwartung, dass die größten Rekuperationsraten durch häufige Geschwindigkeitswechsel bzw. linienprofilbedingte Bremsvorgänge erzielt werden und somit den Kraftstoffverbrauch vermindern. Zudem scheint eine hohe Auslastung, d.h. ein höheres Zuladungsgewicht des Hybridbusses, auf der Linie für die Rückgewinnung von Bremsenergie förderlich zu sein.

Deutlich inhomogener zeigt sich das Ergebnis bei der seriellen Hybridtechnik. Wie in Tabelle 7 dargestellt, schwankt der Einspareffekt innerhalb der Cluster deutlich. Der Schwankungsbereich der relativen Einsparung ist im Vergleich zur Parallelhybridtechnologie mit durchschnittlich 20% deutlich geringer und liegt zwischen 9,6 – 13%.

| Serieller Hybrid | Platzierung | | | Kraftstoffverbrauch (Gelenkbus) [l/100km] | | | | |
|--------------------------|--------------------|-------------------|--------------|--|--------------|-------------------------|-------------------|----------------|
| | Gruppen | Mittelwert | Beste | Schlechteste | Konv. | Serieller Hybrid | Einsparung | |
| | | | | | | | absolut | relativ |
| Gewerbegebiet | 31,9 | 1 | 74 | 57,2 | 49,8 | -7,5 | -13,0% | |
| Schnellbus | 35,4 | 21 | 56 | 55,4 | 48,8 | -6,7 | -12,0% | |
| Tangente Außenraum | 37,3 | 8 | 58 | 56,3 | 49,5 | -6,8 | -12,0% | |
| Stadtrand | 43,4 | 4 | 89 | 57,1 | 50,6 | -6,5 | -11,4% | |
| Verdichtetes Stadtgebiet | 44,2 | 7 | 91 | 57,5 | 51,0 | -6,5 | -11,4% | |
| Tangente Innenraum | 46,3 | 9 | 71 | 58,1 | 51,4 | -6,7 | -11,6% | |
| Innenstadt | 58,3 | 44 | 79 | 57,4 | 51,3 | -6,2 | -10,8% | |
| Hügelig | 58,5 | 19 | 87 | 59,6 | 53,5 | -6,1 | -10,3% | |
| Langer Hst.abstand | 63,0 | 17 | 85 | 57,4 | 51,7 | -5,8 | -10,1% | |
| Tempo 30 Anteil | 64,3 | 18 | 90 | 56,4 | 50,9 | -5,4 | -9,6% | |

Tabelle 7: Auswertung der Liniencluster (serieller Hybrid)

Vergleichsweise hoch ist der Einspareffekt bei Linien mit hohen Reisegeschwindigkeiten und wenigen Halte- und Verlustzeiten, wie sie z.B. für die Cluster „Gewerbegebiet“, „Schnellbus“, „Tangente Außenraum“ und „Stadtrand“ prägend sind. Der Dieselhybridbus mit serieller Antriebsstrangauslegung erfüllt somit nicht die Erwartung hinsichtlich eines Zusammenhangs zwischen Kraftstoffeinsparungen auf Linien mit kurzen Haltestellenabständen und häufigen Geschwindigkeitswechseln, wie etwa beim parallelen Hybridbus. Vielmehr scheinen bei dem seriellen Dieselhybridbus Fahrten mit geringen Geschwindigkeitswechseln und wenigen Unterwegshalten auf der Linie den Kraftstoffverbrauch zu begünstigen.

Grundsätzlich gibt es zwischen beiden Hybridtechnologien nur geringe Überschneidungen hinsichtlich ihrer spezifischen Einsparpotentiale, so dass sich beide Technologien ergänzen können. Insbesondere in Bezug auf die Reisegeschwindigkeiten und die Häufigkeit der Halte an der Strecke unterscheiden sich beiden Technologieansätze deutlich.

Auswirkungen auf das HOCHBAHN-Betriebsprogramm

Die Ergebnisse der Verbrauchssimulation zeigen eindeutig, dass das Einsparpotenzial der Hybridtechnologien je nach Liniencharakteristik sehr unterschiedlich ausfallen kann. Entsprechend kann über eine geeignete Verteilung der Hybridfahrzeuge über die HOCHBAHN-Betriebshöfe die Kraftstoffeinsparung optimiert werden, insofern Umläufe passend abgebildet werden können und die Produktivität nicht negativ berührt wird. Die folgende Abbildung zeigt die mittlere Platzierung für den Parallelhybrid unterteilt nach Betriebshöfen.

| Paralleler Hybrid | Platzierung | | | Kraftstoffverbrauch (Solobus) [l/100km] | | | | |
|--------------------------|--------------------|-------------------|--------------|--|--------------|--------------------------|-------------------|----------------|
| | Betriebshof | Mittelwert | Beste | Schlechteste | Konv. | Paralleler Hybrid | Einsparung | |
| | | | | | | | absolut | relativ |
| Mesterkamp | 36,3 | 5 | 74 | 40,9 | 31,8 | -9,1 | -22,1% | |
| Jasper | 36,8 | 10 | 84 | 40,7 | 31,8 | -8,9 | -21,9% | |
| Langenfelde | 46,2 | 12 | 86 | 40,5 | 32,3 | -8,2 | -20,3% | |
| Harburg | 46,8 | 1 | 91 | 41,4 | 33,2 | -8,2 | -19,6% | |
| Wandsbek | 49,0 | 5 | 88 | 40,8 | 32,2 | -8,6 | -21,0% | |
| Hummelsbüttel | 50,1 | 2 | 89 | 40,4 | 32,3 | -8,1 | -20,2% | |

Tabelle 8: Auswertung der Liniencluster (paralleler Hybrid)

Da die Betriebshöfe der HOCHBAHN ein sehr breites Spektrum an Linien bedienen und das Bedienungsgebiet in der Regel sowohl in die Innenstadt als auch zum Stadtrand reicht, fällt die Ergebnisspanne im Vergleich zur Gruppierung nach Cluster deutlich geringer aus. Innerhalb der einzelnen Betriebshöfe ist das Leistungsangebot sehr inhomogen, alle Höfe weisen sowohl starke als auch schwache Linien auf bezüglich des Einsparpotentials der parallelen Dieselhybridbusse auf, das mit Werten zwischen 19,6- 22,1% ausgewiesen werden kann.

Das Ergebnis für den seriellen Hybrid fällt sehr ähnlich aus. Die seriellen Hybridbusse zeigen auf den Linienbündeln der Betriebshöfe ein sehr homogenes Einsparpotential von 10,9 – 12,2%. Auch bei dieser Zuordnung zeigt sich eine große Varianz (s. Platzierungen) innerhalb der Linien, die den jeweiligen Betriebshöfen zugeordnet sind.

Die Linienbündel der Betriebshöfe zeigen im Vergleich also recht homogene Einsparpotentiale um die 20% bei der parallelen und um die 11% bei der seriellen Antriebstechnik. Diese Ergebnisse geben zwar einen Hinweis darauf, welche Betriebshöfe auch unter der Beachtung weiterer Randbedingungen, wie z.B. das Vorhandensein geeigneter Werkstattinfrastruktur oder dem mittleren Flottenalter je Standort, bevorzugt mit Hybridfahrzeugen ausgestattet werden sollten. Geht man aber für den effizienten Einsatz der Hybridbusflotte von der bestehenden Linienzuordnung der Betriebshöfe aus, ist es dagegen sehr viel entscheidender für die Umlaufbildung die linienspezifische Einsparung der Hybridbussen zu beachten. In der Ableitung ist es somit möglich, Umläufe zu bilden, die besonders geeignet sind, um hohe Einsparungen mit der bestehenden und künftigen Hybridbusflotte der HOCHBAHN zu erzielen.

| <u>Serieller Hybrid</u> | Platzierung | | | Kraftstoffverbrauch (Gelenkbus) [l/100km] | | | | |
|-------------------------|-------------|------------|-------|---|-------|-------------------------|------------|---------|
| | Betriebshof | Mittelwert | Beste | Schlechteste | Konv. | <u>Serieller Hybrid</u> | Einsparung | |
| | | | | | | | absolut | relativ |
| Jasper | 32,7 | 2 | 71 | 57,1 | 50,1 | -7,0 | -12,2% | |
| Wandsbek | 36,6 | 4 | 81 | 57,2 | 50,6 | -6,7 | -11,7% | |
| Langenfelde | 46,5 | 6 | 88 | 57,0 | 50,6 | -6,4 | -11,2% | |
| Mesterkamp | 49,8 | 5 | 88 | 57,4 | 51,0 | -6,4 | -11,2% | |
| Harburg | 53,8 | 1 | 91 | 57,9 | 51,6 | -6,3 | -10,9% | |
| Hummelsbüttel | 54,8 | 10 | 90 | 56,8 | 50,6 | -6,1 | -10,8% | |

Tabelle 9: Auswertung der Betriebshöfe (paralleler Hybrid)

Es erscheint zudem auch vorstellbar über kleine Änderungen der Linienzuordnungen das Leistungsspektrum je Hof homogener zu gestalten, allerdings muss durch eine Mischung „anstrengender“ und „entspannter“ Linien sichergestellt werden, dass die Fahrpersonale aller Höfe möglichst ähnliche Arbeitsbedingungen vorfinden und nicht überfordert werden.

Zusammenfassung

Es lassen sich folgende Ergebnisse und Konsequenzen aus der Auswertung der Simulationsdaten ableiten:

- Entsprechend der vorgenommenen Linienclusterungen zeigen sich beim parallelen Antriebstrang die größten Einsparpotentiale mit 25-27% gegenüber konventionellen Diesel-

bussen auf Linien mit geringer Reisegeschwindigkeit von kleiner 30 km/h und häufigen Halten sowie Linien mit ausgeprägt hügeliger Topographie.

- Die Auswertung der Einsparpotentiale beim seriellen Antriebsstrang mit 12-13% ergab genau entgegen ursprünglicher Annahmen größtmögliche Einsparungen auf Linien mit höheren Reisegeschwindigkeiten größer 30 km/h. Als eine Erklärung für die geringe relative Einsparung kann die komplexere Antriebsstrangauslegung angeführt werden (vgl. auch III.2.4).
- Bei einer Betrachtung der wirtschaftlichen Konsequenzen ist neben den Einsparung an Kraftstoff von etwa 10-25% je nach Einsatzgebiet und Busantrieb zu berücksichtigen, dass der Wartungsaufwand der Hybridbusse derzeit nicht ausreichend genau beziffert werden kann. Viele Instandsetzungsmaßnahmen innerhalb des Projektes wurden noch über den Gewährleistungsvertrag der HOCHBAHN mit dem Hersteller EvoBus abgedeckt, sodass noch keine klare Kostenanalyse zum Instandsetzungsbedarf den Kraftstoffeinsparungen gegenübergestellt werden kann.
- Eine Kommunikation der Ergebnisse gegenüber anderen Verkehrsbetrieben und Busherstellern wird durch die Mitwirkung der HOCHBAHN an der Plattform des VDV zu Elektrobussen sowie der gemeinsamen Plattform des BMVI/BMUB zu Innovativen Busantrieben gewährleistet. Dieser Bericht wird dort zur Verfügung gestellt.
- Die Auswertung der Ergebnisse des Simulationstool bildet somit eine valide Ausgangsbasis zur Ausweitung des Einsatzes von Hybridbussen bei der HOCHBAHN. Die Ergebnisse bilden die grundlegenden Daten zum möglichst effizienten Einsatz von seriellen und parallelen Hybridbussen bei der HOCHBAHN. Sie werden daher bei der künftigen Einsatzplanung für die Umlaufbildung von Hybridbussen berücksichtigt und tragen so zu einem optimierten Betriebseinsatz bei.

III.2 Teilprojekt 2: Technische Betreuung

III.2.1 Arbeitspaket 2.1: Aufbau Werkstatt

Aufgrund der ursprünglich geplanten Steigerung der Hybridbusanzahl war vorgesehen, einen weiteren Hochvolt-Werkstattarbeitsplatz auf dem Betriebshof Wandsbek im Rahmen dieses Arbeitspaketes vorzusehen. Die zunächst geplanten Fahrzeugmengen wurden jedoch aufgrund der zahlreichen technischen Probleme und Optimierungsnotwendigkeiten nicht beschafft. Daher wurde auch kein zusätzlicher Hochvolt-Werkstattarbeitsplatz auf dem Betriebshof Wandsbek errichtet.

Die dafür laut Vorhabenbeschreibung geplanten Vorarbeiten (z.B. Ableitung und Definition der Voraussetzungen sowie Erstellung eines technischen Lastenheftes für den Bau einer Werkstatt) wurden dementsprechend ebenfalls nicht realisiert. Die sich daraus ergebenden Minderbedarfe wurden dem Projektträger bereits im September 2013 mitgeteilt.

III.2.2 Arbeitspaket 2.2: Technische Fahrzeugbetreuung

Die technische Betreuung der Dieselhybridbusse wurde durch entsprechend ausgebildete Mitarbeiter der FFG Fahrzeugwerkstätten Falkenried GmbH, als zuständige Tochtergesellschaft der HOCHBAHN, ausgeführt. In Tabelle 10 sind die während des Gesamtzeitraumes aufgewendeten Stunden der FFG im Rahmen der Fahrzeugbetreuung aufgeführt.

| | pro HJ [h] | kumuliert [h] |
|------------|-------------------|----------------------|
| 2. HJ 2011 | 540 | 540 |
| 1. HJ 2012 | 413 | 953 |
| 2. HJ 2012 | 559 | 1512 |
| 1. HJ 2013 | 1135 | 2647 |
| 2. HJ 2013 | 1179 | 3826 |

Tabelle 10: Auflistung des Personalaufwands bei der FFG

Die wesentlichen Aufgaben des Arbeitspakets 2.2 waren die werkstattseitige Betreuung der DHB-Erprobung, die Anpassung der praktischen Instandhaltungsabläufe sowie die kontinuierliche Verbesserung der Prozesse auf Werkstatt-/Technikebene. Im Projektverlauf wurde an die bestehende sogenannte Regelkommunikation mit dem Fahrzeughersteller, im Sinne von regelmäßigen Telefonkonferenzen und Vorortbesprechungen, in einem zwei- bis dreiwöchigen Turnus angeknüpft, um die Zusammenarbeit mit dem Hersteller weiter zu vertiefen. Diese Termine dienten insbesondere dazu aktuelle Themen und anstehende Instandsetzungsbedarfe aufzuzeigen sowie gemeinsam entsprechende Lösungen auszuarbeiten. Dazu wurde während der Telefonkonferenz der Sachstand zu jedem Fahrzeug protokolliert sowie bei Fahrzeugausfällen

der schnellstmögliche Weg zur Behebung des Problems besprochen und die Verantwortlichkeiten der dazu notwendigen Schritte gemeinsam definiert. Zudem konnte so auch kontinuierlich der erreichte Grad der technischen Weiterentwicklung der Fahrzeuge gemeinsam bewerten werden.

Im Projektverlauf zeigte sich insgesamt eine breite Verteilung der technischen Mängel als charakteristisch für Instandsetzungsarbeiten an den seriellen Dieselhybridbusse. Eine detaillierte Quantifizierung des Auftretens der Ausfallursache wurde daher nicht vorgenommen. Bei den aufgetretenen technischen Mängeln handelte es sich im Wesentlichen um:

- Störungen in der Traktionsbatterie, z.B. durch Ausfall des Batteriemanagementsystems
- Ausfall der Batteriekühlanlage
- Defekte an den Kühlwasserpumpen
- Kühlwasser-Undichtigkeit aufgrund einer gelösten Schlauchschelle oder defekte Kühlmittelschläuche
- Das Heizungssystem stellt in Abhängigkeit der Außentemperatur in gewissen Regelbereichen nicht genügend Heizleistung zur Verfügung
- Ausfälle der Lenkunterstützung wegen Undichtigkeiten am Hydraulikzylinder der Lenkhilfpumpe
- Defekte am Ladeluftkühler u.a. hervorgerufen durch Kühlmittelverlust
- Softwarefehler, die bei erneuten Startvorgängen kurz nach dem Ausschalten des Fahrzeuges zu Rotstörungen führen
- Elektrische Fehler, z.B. „Störung Isolation“
- Störungen an der Antriebsachse, z.B. korrodierte Sensorenstecker (Raddrehzahlsensor) oder Isolationsstörungen im Bereich der Radkästen
- Störung des Antriebselektromotors durch Ölverlust an der Riemenseite
- Vibrationen im Motorraum mit Folgeschäden z.B. im Bereich der Schraubenverbindungen
- Ausfall des Druckluftkompressors
- Defekt an Stoßdämpfern durch Abnutzung im Fahrbetrieb

Aus den vorgenannten, beispielhaften Mängeln resultieren auch die überwiegenden Leistungen bei der Betreuung der Dieselhybridbusse wie beispielsweise:

- Etablierung einer zusätzlichen und erweiterten Durchsicht und Wartung nach einer Laufleistung von jeweils ca. 2.000 km (Nachziehen von Schraubenverbindungen, Prüfung auf Undichtigkeiten, Prüfung von Kabel- und Steckverbindungen etc.)
- Umfassende Diagnoseroutinen und Fehlersuche
- Instandsetzungsmaßnahmen aus diversen weiteren Anlässen
- Ersatzteilbeschaffungen für Nicht-Citaro-Serienteile

- Verfolgung der Mängel und Abklärung der Fehlerursachen mit der EvoBus-Niederlassung bzw. dem Werk Mannheim.

III.2.3 Arbeitspaket 2.3: Weiterbildung des Wartungs- und Instandhaltungspersonals

Um eine hoch qualifizierte und sichere technische Betreuung der Dieselhybridbusse zu gewährleisten, wurden während des Förderprojektes folgende Aus- und Weiterbildungsmaßnahmen durchgeführt:

- Zweitägige Nachschulung der Elektrofachkräfte (neun FFG-Mitarbeiter)
- Jährlich wiederholte Hochvoltsensibilisierungen der etwa 50 FFG-Werkstattmitarbeiter am Standort Hummelbüttel über den gesamten Projektzeitraum

Im Vergleich zu den Teilzielen des Arbeitspakets 2.3 der Vorhabensbeschreibung war eine Erstellung sicherheitstechnischer Verfahrensanweisungen im Projektrahmen nicht mehr erforderlich, da sich entsprechende Informationen aus den Vorgängerzeiträumen als angemessen und praxistauglich erwiesen haben (siehe AP 3.3). Die Hochvoltsensibilisierung wurde in Form von „Train-the-Trainer“-Schulungen durch die Werkstattmeister der FFG durchgeführt. Dadurch konnte eine sukzessive Schulung der Mitarbeiter im ausreichenden Umfang sichergestellt werden.

III.2.4 Arbeitspaket 2.4: Datenerfassung und technische Auswertung

Mit der Zuordnung aller Daten zu den Fahrzeugeinsätzen und eventuellen technischen Störungen nach ihren Ursachen entsprechend einem mit dem Hersteller entwickelten Schlüssel wurde eine Basis für gemeinsame Analysen und Umsetzungen geschaffen. Zudem wurden relevante Kennziffern wie Fahrzeugverfügbarkeit sowie Energieverbräuche (gesplittet nach Diesel und Heizöl) bzw. -einsparungen spezifisch ausgewiesen. Im Rahmen der vereinbarten Regelkommunikation mit dem Fahrzeughersteller (vgl. Arbeitspaket 2.2) wurden Ursachen für die Fahrzeugausfälle analysiert und gemeinsam Maßnahmen zur Verbesserung der Fahrzeugtechnik und Abstimmung der Schwachstellen entwickelt.

Es wurden über den gesamten Projektzeitraum umfangreiche technische Daten erfasst und zur Auswertung (inhaltliche Leistung teilweise im Rahmen des Arbeitspakets 3.1) aufbereitet. Zu den genannten Daten gehören beispielsweise die Erfassung der Energieverbräuche, der Kilometerlaufleistung, der Verfügbarkeit sowie z.B. detaillierte Informationen zu den jeweiligen Ausfallursachen. Die Verfügbarkeit der Busse lag im Vorhabenszeitraum im Durchschnitt bei 65%. Die durchschnittliche Verfügbarkeit für das vierte Quartal 2013 zum Ende des Projektes lag bei 62% und somit etwas über dem Wert aus dem vierten Quartal 2011 zu Beginn des Projektes mit 58%. Die dazu gehörigen Varianzen lagen zu Projektbeginn zwischen 39 – 71%, zum Ende des

Vorhabens bei Werten zwischen 46 – 81%. Insgesamt ließ sich somit keine signifikante Verbesserung der Verfügbarkeit der Dieselhybridbusse feststellen, die durch die Maßnahmen des Umrüstpakets erzielt werden sollten. In Abbildung 9 sind die über die Projekt quartale gemittelten Verfügbarkeiten der fünf Dieselhybridbusse dargestellt. Die Kundenfelderprobungsfahrzeuge tragen die Nummern 7051 und 7052. Die Vorserienfahrzeuge tragen die Nummern 7151, 7152 und 7153.

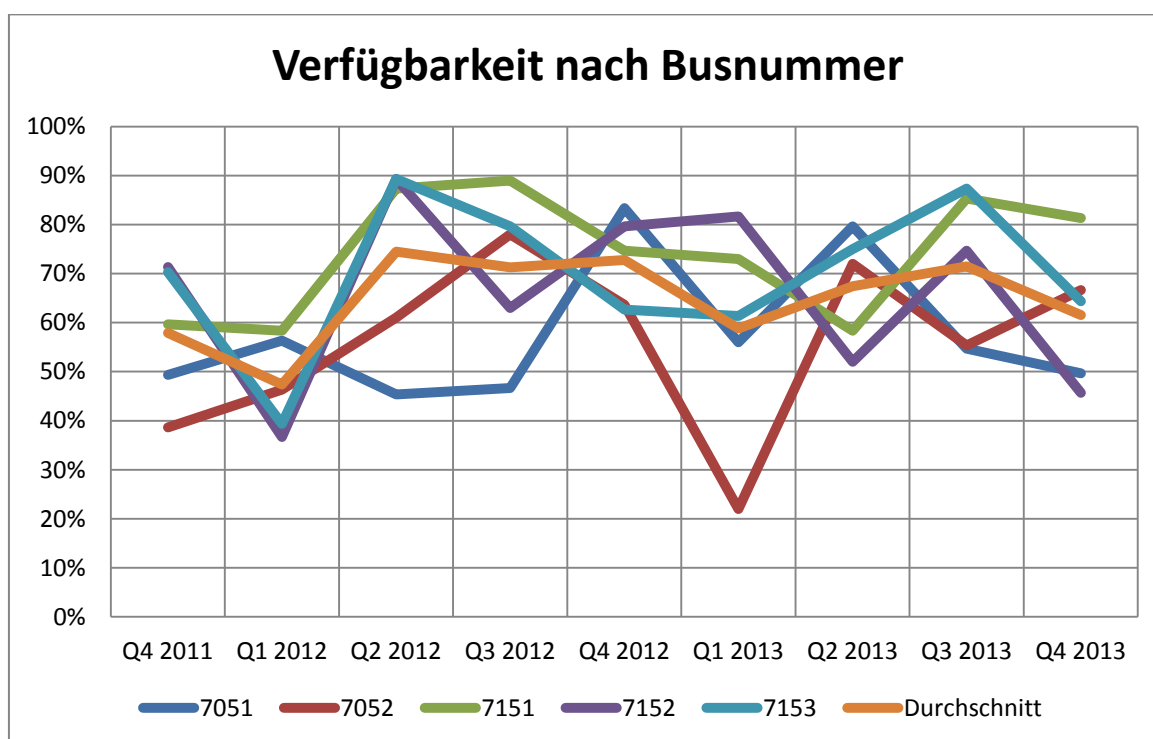


Abbildung 9: Verfügbarkeit nach Busnummer

Die in AP 2.2 aufgezählten notwendigen Instandhaltungsmaßnahmen führten im Verlauf des Vorhabens zu leichten Beeinträchtigungen der Verfügbarkeit der Busse im Zuge längerer Werkstattaufenthalte. Die durchgeführten Arbeiten hatten eine Steigerung der Verfügbarkeit und damit auch einen Anstieg der monatlichen Laufleistung der Dieselhybridbusse zum Ziel. Statt einer Steigerung konnte nur eine Verstetigung der Verfügbarkeit beim kontinuierlichen Einsatz der Dieselhybridbusse im Liniendienst erzielt werden. Eine Bewertung der durchgeführten Maßnahmen im Hinblick auf die mittelfristige Entwicklung der Busse kann zum Ende des Vorhabens aber noch nicht vorgenommen werden. Es ist allerdings ein leicht positiver Entwicklungstrend erkennbar.

Auffällig ist bei der Gegenüberstellung der Kundenfelderprobungsfahrzeuge (705x) und der Vorserienfahrzeuge (715x), dass zum Ende des Vorhabens kaum noch Unterschiede hinsichtlich der Verfügbarkeit der zwei Fahrzeugvarianten ausgemacht werden können. Die Ertüchtigung

gung der Kundenfelderprobungsfahrzeuge kann somit als erfolgreich abgeschlossen bewertet werden. Der technische Reifegrad dieser zwei Fahrzeuggenerationen hat sich somit im Laufe des Projektes stark angenähert.

III.3 Teilprojekt 3: Optimierung Instandhaltung

III.3.1 Arbeitspaket 3.1: Evaluation der Daten aus Arbeitspaket 2.4

Im Mittelpunkt der Tätigkeiten des Arbeitspakets 3.1 stand die Aufbereitung und Auswertung der Daten, die im Rahmen des Arbeitspakets 2.4 erhoben und vorgestellt wurden (Laufleistung, Verfügbarkeit, Tankdaten). Dabei wurden schwerpunktmäßig beispielsweise nachfolgende Aufgaben bearbeitet:

- Beobachtung von Auffälligkeiten bei den Ausfallgründen der Fahrzeuge durch das vorlaufende halbtagesgenaue Monitoring der Verfügbarkeit und ggf. der Dokumentation der Wartungsgründe bzw. Ausfallursachen.
- Zusammenfassung und Bewertung der techn. Auffälligkeiten im Rahmen einer Verfügbarkeitsdarstellung
- Auswertung und Detailanalysen des Kraftstoffverbrauches sowie Untersuchungen zu Schwankungen im Treibstoffverbrauch

Die vorgenannten wesentlichen Erkenntnisse und Analysedaten wurden im Rahmen der Regelkommunikationsgespräche auch mit den Servicetechnikern des Fahrzeugherstellers erörtert, um mögliche Ableitungen und Verbesserungspotentiale zu evaluieren.

Die gemäß Vorhabensbeschreibung gesetzten Teileziele des Arbeitspakets 3.1 (Datenauswertung und Bewertung der Schadenshäufigkeiten, Ableitung und Diskussion der wesentlichen Erkenntnisse u.a. mit Hersteller sowie funktionelle Vorgaben für künftige Instandhaltung) wurden somit erreicht.

III.3.2 Arbeitspaket 3.2: Optimierung der Instandsetzungskonzepte

Wesentliche Schwerpunkte bei der Betreuung der Dieselhybridbusse waren im Verlauf des Vorhabens

- Intensivierung der Kommunikation mit dem Hersteller und Verabredung einer themenzentrierten Regelkommunikation
- Erstellung von Berichten und Auswertungen (intern/extern) inklusive Vorbereitung diverser Projektsitzungen

- Abstimmung mit der Feuerwehr Akademie Hamburg zum Verhalten bei Unfällen (Batteriebrand etc.)
- Standardisierung bzw. Zentralisierung der Kommunikationswege
- Abstimmungen zur Optimierung des Heizungssystems der Fahrzeuge

Um die bestehenden Konzepte für die Instandhaltung der Fahrzeuge an die Anforderungen aus den neuen Dieselhybridbussen (Dacharbeitsplätze, Hochvolttechnologie etc.) zu adaptieren, wurde der Austausch mit dem Hersteller kontinuierlich weiterverfolgt. Dazu wurden dem Fahrzeughersteller die Ergebnisse der gemäß Arbeitspakt 3.1 evaluierten Daten zur Verfügung gestellt und mögliche Optimierungspotentiale diskutiert. Wesentliche Kenngröße war dabei die Verfügbarkeit der Fahrzeuge bei gleichzeitiger Dokumentation der vorliegenden Ausfallursache. Viele der im Optimierungspaket eingeflossenen Verbesserungen stammten von den Anregungen und Rückmeldungen von FFG bzw. aus dem Austausch zwischen EvoBus und FFG (z.B. die elektrische Kühlwasserauffüllung oder eine automatische Ölstandsensierung für den Luftpresse). Die durch die tägliche Instandsetzungsroutine erlangte Erfahrung im Umgang mit den Dieselhybridbussen konnte so auch direkt in die Weiterentwicklung des Fahrzeugkonzeptes durch die FFG eingebracht werden.

Um neben den aktuellen Mängeln die generelle Praxistauglichkeit der Fahrzeuge zu verbessern und weitere Treibstoffreduktionen zu erreichen, wurden gemeinsam Maßnahmen zur technischen Optimierung der Busse mit dem Hersteller entwickelt. Es wurde ein Optimierungspaket in vier Schritten abgestimmt, das innerhalb der Projektlaufzeit gemeinsam mit EvoBus abgeschlossen wurde. Hier standen vor allem die Fahrzeuge der ersten Auslieferungsstaffel, die sogenannte Kundenfelderprobungsfahrzeuge, im Mittelpunkt. Bei der zweiten Auslieferungsstaffel, den so genannten Vorserienfahrzeugen, sind einige technische Optimierungen zum Teil schon eingeflossen.

Wie in Abbildung 10 dargestellt, konnten durch das notwendige Optimierungspaket wesentliche Verbesserungen für den Betrieb und die Instandhaltung der Kundenfelderprobungs- und Vorserienfahrzeuge erzielt werden. Dies zeigt sich auch insbesondere im Hinblick auf die Verfügbarkeit der Kundenfelderprobungsfahrzeuge in AP 2.4.

In Bezug auf das Thema „Energieverbrauch“ (d.h. Diesel- u. Heizölverbrauch) konnte zwar eine Reduzierung des Heizölverbrauchs um etwa 1/3 im vorliegenden Projekt erzielt werden. Der Verbrauch bewegt sich aber dennoch im Vorhabenszeitraum auf hohem Niveau von durchschnittlich etwa 120% im Vergleich zu einem EURO-5-Dieselbus als Referenzbus. Hier wäre eine Weiterentwicklung des Heizungssystems notwendig, sodass eine den konventionellen Dieselnbussen vergleichbare Heizleistung erreicht wird, ohne dass damit ein zusätzlicher Verbrauch an Brennstoff verbunden ist.

Trotz aller Maßnahmen zur Optimierung der Verbräuche der Nebenaggregate der fünf Fahrzeuge ist es innerhalb des Vorhabens nicht gelungen, den Kraftstoffverbrauch weiter zu senken.

Die Einsparungen zeigten sich während des Vorhabens mit durchschnittlich 13%. Diese Einsparungen wurden bereits zum Ende des vorhergegangenen Projektes erzielt.

| Umrüstpaket DHB | | | |
|-----------------|--|---|--|
| Step | Ziel | Maßnahmen | Bewertung |
| 1 | Erhöhung der Verfügbarkeit | -Verbesserung von Antriebsachsen und Dieselmotor | + Die Dauerstabilität der Komponenten konnte maßgeblich verbessert werden. |
| | | -Anpassungen Software Energiemanagement | + Häufigeres Ausschalten des Dieselmotors erreicht. |
| | | -Reduzierung von Fehlermeldungen | + Die Anzahl an Gelb- und Rotstörungen konnten signifikant reduziert werden. |
| | | -Verbesserung des Heizsystems durch Nutzung der Dieselmotorabwärme | o HO-Verbrauch konnte um etwa 1/3 reduziert werden, jedoch ist das Niveau noch immer zu hoch. |
| 2 | Verbesserung Dieselmotor-Betriebsverhalten Reduktion Kraftstoffverbrauch; | -Verbesserung des Abschaltverhaltens des Dieselmotors | + Gleichmäßigerer Betrieb des Dieselmotors erreicht. |
| | | -Bedarfsgerechtes Zu- und Abschalten von Nebenaggregate durch eine Softwareanpassung. | o DK-Verbrauchsenkung konnte nicht festgestellt werden. |
| 3 | Verbesserung der Instandhaltungsfreundlichkeit, Reduktion Kraftstoffverbrauch | -Automatisches Ölnachfüllen über Nachfüllvorrichtung | + Verbesserung der IH-Freundlichkeit |
| | | -Nachrüstung elektrische Kühlwasserauffüllung | + Verbesserung der IH-Freundlichkeit |
| | | -Aufspielen der Steuergeräte-Software (konventioneller Teil) | + Verbesserung der Diagnosefreundlichkeit |
| | | -Installation eines Hybrid-Fahreranzeigekonzeptes | + Verbesserung der Informationen für den Fahrer |
| 4 | Reduktion Kraftstoffverbrauch | -Optimierung der Nebenaggregate-Verbräuche und der Nutzung der Bremsenergie durch Steuergeräte-Update (Hybrid-Teil) | o Es konnte keine dauerhafte nennenswerte Verbesserung des Dieserverbrauches festgestellt werden. |

Abbildung 10: Umrüstpaket DHB

Zudem sind das sogenannte „Busdoc“, also das vom Fahrzeughersteller beigestellte EDV-System für den werkstattseitigen Zugriff auf die elektronische Fahrzeugdokumentation und das Ersatzteilwesen) sowie die geführte Diagnose nicht auf dem Stand vergleichbarer Serienfahrzeuge. Beispielsweise fehlen im vorgenannten System noch Ersatzteileinträge für planmäßige Wartungsarbeiten, was aus Nutzersicht zu entsprechendem Mehraufwand in der Instandhaltungslogistik sorgt.

Da das Fahrzeugmodell nach Herstellerangaben jedoch nicht weiterentwickelt wird (d.h. keine (Weiter-)Entwicklung einer Euro-6-Variante) sind voraussichtlich keine wesentlichen diesbezüglichen Investitionen und Maßnahmen auf Seiten des Herstellers zu erwarten. Die gewonnenen Erfahrungen durch die Arbeiten der FFG dienen dabei dem weiteren Ausbau der Instandsetzungs-Know-Hows im Bezug auf dieselelektrische Antriebe. So konnten diese u.a. bei der Erstellung eines Lastenheftkapitels zu neuen Antriebstechnologien eingebracht und verarbeitet werden.

Aufgrund der umfangreichen Datenerfassung konnten nunmehr, wie auch im Rahmen des Arbeitspakets 3.1 deutlich wird, verstärkte Anstrengungen zu Fehlerminimierung sowie Fahrzeugoptimierung erfolgen, die zu einer leichten Überschreitung der Aufwendungen gegenüber dem Planungsstand führten.

Vor diesem Hintergrund haben sich die zurückliegend realisierten Verbesserungsmaßnahmen im täglichen Instandhaltungsregelgeschäft bereits bewährt und zur Optimierung der praktischen Arbeitsabläufe geführt.

Weiterhin wurde die eigens erstellte Verfahrensanweisung für Hybridbusse während der Projektlaufzeit verfeinert und inhaltlich durch weitere, zwischenzeitlich in die Erprobung aufgenommene Hybridfahrzeug-Modelle ergänzt. Die resultierende Verfahrensanweisung hat sich sehr bewährt.



Abbildung 11: Auszug aus der Verfahrensanweisung der FFG

Die tatsächliche Umsetzung der vorgenannten Optimierungspakete selbst lag vor allem in der Verantwortung des Herstellers. Der Hersteller hat die Umsetzung des sogenannten Optimierungspaketes, bestehend aus den vier benannten Teilarbeitspaketen, im Laufe des Projektzeitraumes in Abstimmung mit der FFG abgeschlossen. Da während der Projektlaufzeit, wie bereits zuvor beschrieben, auf Seiten des Herstellers beschlossen wurde, die grundsätzliche Weiterentwicklung des Fahrzeugkonzeptes (in Hinblick auf einen EURO-6-Antrieb und weitere Entwicklungsschritte) nicht weiterzuverfolgen, wurde auch die Service- und Ingenieurseitige Betreuung von Seiten des Fahrzeugherstellers nicht mehr durch separat abgestellte Mitarbeiter, sondern auf dem Wege der regulär bestehenden After-Sales-Strukturen geleistet. Insbesondere die beiden in der Vorhabensbeschreibung genannten Teilziele „Ableitung darüber hinausgehender Optimierungspotentiale anhand der Erkenntnisse des Erprobungsbetriebs“ und „Ablei-

tung noch verbleibender Optimierungspotentiale bei allen im Betrieb eingesetzten Dieselhybridbussen gemeinsam mit der Fahrzeugindustrie“ konnten deshalb nicht wie im ursprünglich geplanten Umfang realisiert werden. Die Auswirkungen dieses Umstandes auf den zurückliegenden Projektzeitraum werden allerdings als „gering“ (d.h. keine negativen Auswirkungen) eingestuft. Die übrigen Teilziele wurden wie geplant erreicht.

III.3.3 Arbeitspaket 3.3: Prozessbeschreibungen, Überarbeitung bestehender Standards

Als wesentliches Teilziel des Arbeitspaketes wurde die Abstimmung der Instandhaltungsaktivitäten mit den zuständigen Genehmigungsinstanzen (u.a. TÜV) definiert.

Aufgrund des sogenannten „seriellen Antriebes“ der Fahrzeuge war es erforderlich, das Verfahren im Rahmen der gewöhnlichen Dieselbus-Instandhaltung übliche Verfahren für die Abgasuntersuchung anzupassen. Verantwortlich für die Durchführung dieses Prozesses war EvoBus als Hersteller des seriellen Dieselhybridbusses. Durch den seriellen Antrieb ist dieses Problem erstmalig aufgetreten und musste grundsätzlich zwischen dem Hersteller und den zuständigen Genehmigungsinstanzen, wie etwa dem TÜV, geklärt werden. Das gemeinsam mit EvoBus als Hersteller neu abgestimmte Verfahren für die Dieselhybridbusse wurde somit im Jahr 2012 erstmalig eingeführt und angewendet. Die gemäß Vorhabensbeschreibung ursprünglich benannten weiteren Teilziele (Dokumentation von Soll-Instandhaltungsprozessen, Ableitung neuer Wartungs- und Reparaturkonzepte für Hybridbusse) wurden hauptsächlich im Rahmen der Arbeitspakete 2.2 und 3.2 mitbearbeitet.

III.4 Teilprojekt 4: Kommunikation und Dokumentation

III.4.1 Arbeitspaket 4.1: Öffentlichkeitsarbeit und Dissemination

Im Rahmen der Öffentlichkeitsarbeit und Dissemination wurden in der Vorhabensbeschreibung für das Projekt EBTO die kontinuierliche Pflege und Aktualisierung der Website www.busbus-hamburg.de festgelegt und umgesetzt. Wie bereits im Projekt Dieselhybridbusse (2009 bis 2011) war das Interesse an der Technologieinformation über die Website gleichbleibend hoch. Im Durchschnitt haben sich etwa 177 Besucher je Monat umfassend über die Hybridtechnologie und den Einsatz der Dieselhybridbusse in Hamburg informiert. Die Gesamtzahl der Seitenaufrufe betrug rund 4.250.

Neben der Website dienten wie bereits im Vorgängerprojekt die Außen- und Innengestaltung der Fahrzeuge dazu, die wesentlichen Kernbotschaften der Hybridtechnologie zu kommunizieren. Während der Fahrt mit dem Hybridbus wird den Fahrgästen auf Monitoren der jeweilige aktuelle Energiefluss in Echtzeit gezeigt.

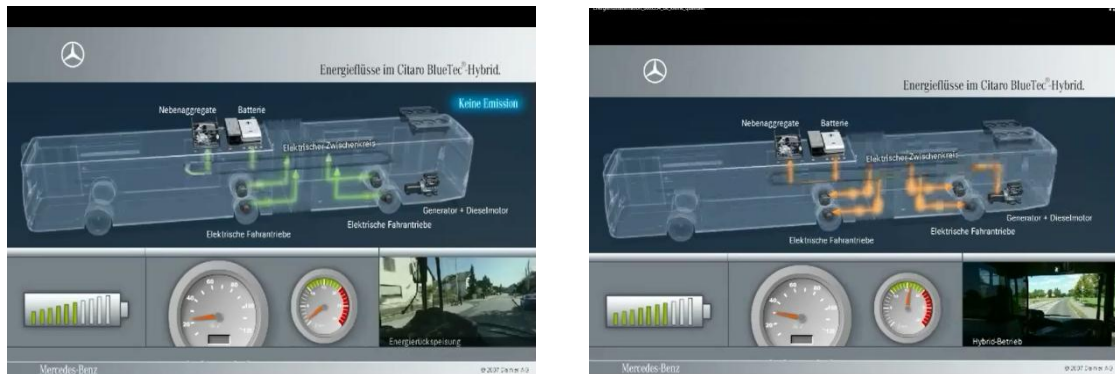


Abbildung 12: Ausschnitte des Energieflussdiagramms im Dieselhybridbus: Links bei der Energierückgewinnung, rechts im Hybridbetrieb

Der geplante Infofilm zur Öffentlichkeitsarbeit, der die Technologie, den Mehrwert der Fahrzeuge und die Kenntnis bzw. Akzeptanz des Einsatzes neuer Antriebstechnologien darstellen sollte, wurde nicht umgesetzt, weil er wirkungsvoller in ein einheitliches und größer angelegtes Kommunikationskonzept eingebunden werden soll. Mit dem Fahrplanwechsel Ende des Jahres 2014 sollen alle Hybridtechnologien der HOCHBAHN auf der sogenannten Innovationslinie 109 gebündelt zum Einsatz kommen. Dazu zählen auch die seriellen Dieselhybridfahrzeuge. Innerhalb des dafür vorgesehene gesamthaften Marketingkonzeptes werden auch die innerhalb des vorliegenden Projektes erprobten Busse eingebunden.

Durch die Maßnahmen der Öffentlichkeitsarbeit könnte im Rahmen des Vorhabens verdeutlicht werden, dass der ÖPNV mit Bussen bereits heute einen starken Beitrag für eine klimaschonende Mobilität leistet und diesen mit dem Ausbau des Einsatzes innovativer Antriebstechnologien weiter ausbauen wird. Damit wurde gezielt auch eine wachsende Gruppe von Nutzern angesprochen, die aus Gründen des Klimaschutzes zum öffentlichen Verkehr zu wechseln bereit ist.

III.4.2 Arbeitspaket 4.2: Berichtswesen, Projektmanagement

Neben der inhaltlichen und administrativen Koordination, stand die Überwachung einer ergebnisorientierten Umsetzung der Arbeitspakete. Es wurde eine kontinuierliche Kontrolle der Arbeitsergebnisse und Meilensteine durch regelmäßige Sitzungen der Projektgruppe in einem vierwöchigen Turnus sichergestellt. Wesentlicher Inhalt dieser Sitzungen war eine Abstimmung zum Sachstand hinsichtlich des Betriebs und der Instandsetzung der Dieselhybridbusse sowie zur inhaltlichen Umsetzung innerhalb der Arbeitspakete. Zum Abschluss des Projektes im De-

zember 2013 wurden alle Arbeitspakete trotz anfänglicher Verzögerungen im Verlauf des Projektes umfassend und ergebnisorientiert bearbeitet und termingerecht abgeschlossen.

In Abstimmung mit dem Projektträger wurde im September 2013 das Vorhaben kostenneutral bis zum 31.12.2013 verlängert. Wesentlicher Grund für die Verlängerung waren die Arbeiten im AP 1.3 zur Priorisierung künftiger Einsatzprofile. Im Zuge der Erstellung des Simulationstools zur Bewertung der Einsätze von Hybridbussen im Abgleich mit den Linienprofilen der HOCHBAHN wurde Nachbesserungsbedarf hinsichtlich des Simulationsansatzes festgestellt. Um die notwendigen Anpassungen vornehmen zu können, wurde im September 2013 eine entsprechende Projektverlängerung beantragt und durch den Projektträger bewilligt.

IV Zusammenfassung, Empfehlung, Ausblick

IV.1 Zusammenfassung der Ergebnisse

In der Laufzeit des Vorhabens über 27 Monate wurden fünf serielle Hybridbusse bei der HOCHBAHN im Linienbetrieb erprobt sowie hinsichtlich ihrer Fahrzeugtechnik umfassend betreut und technische Optimierungspotenziale abgeleitet und umgesetzt. Ergänzend wurde eine Untersuchung mit parallelen und seriellen Hybridbusse durchgeführt. Nachstehend werden die wichtigsten Ergebnisse dieses Fördervorhabens zusammengefasst. Ergänzend wurden im Abgleich mit den seriellen Hybridbussen auch parallele Dieselhybridbusse hinsichtlich der Kraftstoffeinsparpotentiale:

- Ausgehend von einer intensiven technischen Analyse der aufgetretenen Fehler und wartungsanfälligen Komponenten wurden in enger Abstimmung zwischen EvoBus als Fahrzeughersteller und der FFG als dem für die technische Betreuung der Busse zuständigen Dienstleistungsunternehmen im Rahmen des Vorhabens ein umfassendes Programm zur Optimierung der Instandhaltung der Hybridbusse definiert und umgesetzt. Die Verfügbarkeit der Dieselhybridbusse konnte dadurch verstetigt sowie die Instandhaltungsfreundlichkeit der Busse erhöht werden.
- Durch die Umsetzung der entsprechenden Maßnahmen wurde eine Verstetigung der erzielten Verfügbarkeiten der Fahrzeuge erreicht und somit eine kontinuierliche steigende Laufleistung der Dieselhybridbusse gewährleistet. Die Fahrzeuge entsprechen aber damit noch nicht der Serienreife, insbesondere vor dem Hintergrund, dass keine signifikante Verfügbarkeitssteigerung erzielt werden konnte. Auch eine weitere Reduzierung des Kraftstoffbedarfes wurde trotz umfassender Maßnahmen in Zusammenarbeit mit dem Hersteller nicht erreicht.
- Die Hybridbusse wurden hauptsächlich auf Linien der HOCHBAHN im Bereich der Hamburger Innenstadt eingesetzt. Die Verfügbarkeit der Hybridbusse zeigte sich im Durchschnitt bei etwa 65% und hat sich innerhalb der seriellen Hybridflotte verstetigt. Sie blieb damit aber hinter den anfänglichen Erwartungen einer Verfügbarkeit von 80% zum Projektende zurück. Die seriellen Dieselhybridbusse sind daher nur als bedingt einsatzreif zu bewerten. EvoBus hat die Weiterentwicklung des Fahrzeugkonzeptes eingestellt.
- Im Rahmen der Erprobung in diesem Einsatzfeld konnte eine Verminderung des Treibstoffverbrauchs im Vergleich zu einem konventionellen Dieselbus in einem Umfang durchschnittlich 13 Prozent erzielt werden. Dieses Einsparpotential war allerdings zum Ende des Vorgängerprojektes bereits bekannt und hat sich verstetigt. Die Gründe für die hinter den Erwartungen zurückbleibende Reduzierung (Einsparung paralleler Hybridbus: ca. 20%) sind im Wesentlichen der komplexen Auslegung des seriellen Antriebstrang und der aufeinander abzustimmenden Integrationen aller Einzelkomponenten geschuldet. Durch die

Langzeitevaluation im Projekt konnten keine Anpassungen der Dieselhybridbusse identifiziert werden, die zu einer weiteren signifikanten Verbrauchseinsparung durch technische Verbesserungen führen.

- Die Kraftstoffverbräuche der seriellen Dieselhybridbusse aus dem vorliegenden Förderprojekt sowie von Hybridbussen mit parallelem Antriebsstrang aus einem anderen Förderzusammenhang wurden innerhalb eines Messprogramms auf einem größtmöglichen Linienspektrum unterschiedlicher Profilausprägung für Test- und Messfahrten erfasst. Dies macht einen direkten Vergleich der beiden Antriebstechnologien möglich mit dem Ziel die wesentlichen Liniencharakteristika zu identifizieren, die einen möglichst effizienten Einsatz der Hybridtechnologie ermöglicht.
- Die Ergebnisse des Messprogramms bilden neben einer Antriebsstragsimulation der seriellen und der parallelen Hybridbusse eine wesentliche Grundlage für die Ausarbeitung eines Simulationstools zur Übertragung der Einsparungsergebnisse auf das gesamte Liniennetz der HOCHBAHN.
- Die Auswertung der Simulationsergebnisse erfolgte nach Linienclustern, die durch Linien vergleichbarer Profilausprägung gebildet wurden. Für die seriellen Dieselhybridbusse wurden potentielle Kraftstoffeinsparungsmöglichkeiten von 9,6% – 13,0% ausgewiesen. Der Nachweis des rein elektrischen Fahrens über eine Distanz von 13 km wurde erbracht. Hybridbusse mit parallelem Antriebsstrang ergaben sich sogar Einsparungen von 16,3% – 27,9%.
- Durch das Simulationstool konnten Linien identifiziert werden, die besonders geeignet für den Einsatz von Hybridbussen sind. Bei seriellen Hybridbussen sind dies insbesondere Linien mit Reisegeschwindigkeiten größer als 30 km/h, geringen Geschwindigkeitswechseln und wenigen Unterwegshalten auf der Linie. Bei parallelen Hybridbussen sind dies dagegen Linien mit geringer Reisegeschwindigkeiten von kleiner 30 km/h und häufigen Halten sowie Linien mit ausgeprägt hügeliger Topographie. Vor dem Hintergrund des Ausbaus der Hybridbusflotte bei der HOCHBAHN können diese Erkenntnisse für die künftige Umlaufplanung berücksichtigt werden.
- Die Annahme, dass Einsparungen durch den Einsatz von seriellen Hybridbussen höher ausfallen als beim Einsatz von parallelen Hybridbussen, lässt sich aufgrund der Mess- und Simulationsergebnisse nicht bestätigen. Auch die These, dass gerade Dieselhybridbusse mit serieller Antriebsstrangauslegung auf Linien mit kurzen Haltestellenabständen besonders effizient eingesetzt werden können, wurde aufgrund der Auswertungen in AP 1.3 widerlegt. Dagegen bestätigen die Ergebnisse der parallelen Hybridbusse die Annahme auch in Hinblick auf häufige Geschwindigkeitswechsel, die bei dieser Hybridauslegung der Bremsenergieerückgewinnung förderlich sind (vgl. AP 1.3).
- Die Aus- und Weiterbildung der Mitarbeiter im Bereich der Fahrzeugtechnik konnte mit Unterstützung durch den Bushersteller umfassend und in kurzer zeitlicher Folge umgesetzt werden, sodass alle Anforderungen zuständiger Stellen wie Berufsgenossenschaft von Be-

ginn an qualifiziert erfüllt werden konnten. Seitens der Mitarbeiter besteht ein vorbehaltloses Interesse an der neuen Technologie. Auch im Fahrdienst wurden in den relevanten Themen wie Sicherheit, Handhabung des Busses, Klimavorteile etc. unterwiesen.

- Eine Bewertung zur Wirtschaftlichkeit ist ausgehend von den bisherigen Erkenntnissen etwa zum Aufwand für die technische Betreuung oder die eingesparten Treibstoffkosten nur sehr eingeschränkt möglich. Die entsprechenden Werte sind zurzeit noch sehr durch die spezifischen Anforderungen einer noch nicht serienreifen Technologie und einer maximalen Einsatzdauer von bisher erst 2,5 – 3 Jahren geprägt. In jedem Fall ist jedoch bereits erkennbar, dass zum Erreichen einer vollständigen Kompensation der Investitionsmehrkosten durch einen geringeren Treibstoffverbrauch über die Lebensdauer der Hybridbusse deutlich sinkende Beschaffungspreise erforderlich sind (siehe VI. 1).
- Durch verschiedene Kommunikationsmaßnahmen und -medien wurde die Öffentlichkeit über die Technologie und die Vorteile der seriellen Hybridbusse informiert.
- Die Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter im Fahrdienst bewerten die Dieselhybridbusse positiv. Dieses gilt insbesondere für die geringere Geräuschbelastung und das komfortable und sichere Fahren im Liniendienst.

Die Daten aus der Erprobung der seriellen Hybridbusse bei der HOCHBAHN sind in die Untersuchungen der vom BMVI initiierten *Plattform Innovative Busantriebe* eingegangen. Damit tragen sie zu einer hohen Wahrnehmung für den Stand der Entwicklung von Hybridbussen bei potenziellen anderen Verkehrsunternehmen bei. Wegen der hohen Aufmerksamkeit, die die Erprobung bei der HOCHBAHN bei befreundeten Verkehrsunternehmen und Aufgabenträgern erreichten konnte, wird ebenfalls ein Beitrag zur Vorbereitung des künftigen Marktes für Hybridbusse geleistet.

IV.2 Empfehlungen und Übertragbarkeit der Ergebnisse

Die im vorausgehenden Kapitel zusammengefassten Ergebnisse sind auf andere Verkehrsunternehmen und Regionen übertragbar. Zudem erlauben sie umfassende Empfehlungen für die technische Optimierung der Hybridbusse und verdeutlichen exemplarisch, wo noch weitere Optimierungsnotwendigkeiten bestehen.

Auch wenn die Rahmenbedingungen für den Betriebseinsatz primär für die Linien der HOCHBAHN gelten, liefern sie doch bereits Indikationen für einen Einsatz von seriellen Hybridbussen bei anderen Verkehrsunternehmen, vor allem in stark verdichteten Metropolen mit hohem Verkehrsaufkommen.

Im Rahmen der Plattform Innovative Antriebe Bus sowie der VDV-Plattform Elektrobusse hat die HOCHBAHN intensiv an dem fachlichen Austausch mit Busherstellern und anderen Verkehrsunternehmen mitgewirkt. Die HOCHBAHN wird die im vorliegenden Projekt erworbenen Erkenntnisse und Einschätzungen innerhalb dieser Netzwerke mit den beteiligten Partner teilen

und diskutieren, um Möglichkeiten der Übertragbarkeit bei wachsenden Hybridbusflotten gemeinsam zu identifizieren.

IV.3 Ausblick und weiterer Forschungsbedarf

Die Ergebnisse der Erprobung der seriellen Hybridbusse bei der HOCHBAHN zeigen insbesondere im direkten Abgleich mit den parallelen Dieselhybridbussen, dass mit der durchgeführten technischen Ertüchtigung zwar eine Verstärkung der technischen Verfügbarkeit und der Laufleistung erreicht werden konnten, eine Einsatzreife der Busse konnte jedoch nicht erreicht werden. Auch der Hersteller EvoBus wird aus strategischen Gesichtspunkten keine Weiterentwicklung des seriellen Dieselhybridbusses, z.B. als EURO-6-Fahrzeug, verfolgen. Vielmehr werden sich die Aktivitäten bei EvoBus auf die Weiterentwicklung reiner elektrischer Antriebssysteme mit Batterien und Brennstoffzellen konzentrieren. Optimierungsbedarf auf dem Weg zur vollständigen Einsatzreife besteht trotzdem bei den seriellen Hybridbussen. Hier sind vor allem zu nennen:

- Die Weiterentwicklung des Heizungssystems, sodass eine den konventionellen Dieselbussen vergleichbare Heizleistung erreicht wird, ohne dass damit ein zusätzlicher Verbrauch an Brennstoff verbunden ist.
- Die Erhöhung der Verfügbarkeit auf 80% entsprechend den anfänglichen Erwartungen sowie weitere Verbrauchsreduktion von etwa 20%, um das Einsparungsniveau der parallelen Dieselhybridbusse zu erreichen.
- Die Ableitung und Umsetzung von Flottenszenarien basierend auf den im Vorhaben erzielten Erkenntnissen für eine anwachsende Zahl von Hybridbussen innerhalb der HOCHBAHN-Flotte, um eine optimierte Treibstoffreduktion beim Einsatz dieser Hybridbusse zu gewährleisten. Im September 2014 wird die HOCHBAHN in diesem Zusammenhang 20 Dieselhybridbusse mit parallelem Antriebsstrang von VOLVO beschaffen. Fünf Hybridbusse werden in der Variante als Solobus, 15 Hybridbusse in der Variante als Gelenkbus in den Einsatz gebracht.

V Verwertung und Anschlussfähigkeit

V.1 Voraussichtlicher Nutzen der Projektergebnisse

Die Strategie der HOCHBAHN für ihre Busflotte ist darauf ausgerichtet, ab voraussichtlich 2020 in wachsendem Umfang Busse mit emissionsarmen oder vollständig emissionsfreien Antrieben einzusetzen. Vor diesem Hintergrund kommt der Erprobung und Weiterentwicklung des Hybridantriebes bei Bussen eine Bedeutung als Brückentechnologie zu. Dazu hat die HOCHBAHN eine strategische Zusammenarbeit mit EvoBus vereinbart, wie sie in dem vorliegenden Projekt bereits erfolgreich realisiert wurde. Gegenstand der Zusammenarbeit sind neben Dieselhybridbussen auch Brennstoffzellenhybridbusse, die heute schon einen Betrag zur emissionsfreien Mobilität im Öffentlichen Personennahverkehr leisten können.

Des Weiteren hat die HOCHBAHN zu Beginn des Jahres 2014 ein Projekt zum Einsatz von Plug-In-Bussen und Batteriebusen des Herstellers VOLVO gestartet. Ziel ist Errichtung von Ladestationen sowie die Beschaffung von drei Plug-In- und drei Batteriebusen sowie die betriebliche Erprobung der Fahrzeuge und der zugehörigen Ladeinfrastruktur.

Die HOCHBAHN hat während der Projektlaufzeit durch die Betreuung von Fachbesuchern aus anderen Verkehrsunternehmen bzw. von politischen Entscheidungsträgern aus anderen Regionen zu einer differenzierten Wahrnehmung für die derzeit bestehenden Vorteile des Einsatzes von Hybridbussen und den noch bevorstehenden technologischen Herausforderungen beigetragen. Die Kenntnisse über die technischen Möglichkeiten und Einschränkungen der neuen Technologie bei einer insgesamt betriebsorientierten Bewertung konnten zudem erweitert werden.

V.2 Bekanntgewordener Fortschritt bei anderen Stellen während der Projektlaufzeit

Alle Bushersteller beschäftigen sich zurzeit mit großem Engagement mit der Weiterentwicklung der Busantriebe, vor allem durch verschiedene Formen der Hybridisierung. Die jeweiligen Entwicklungen werden in der Fachpresse bzw. auf Fachmessen und –konferenzen zwar von ihnen erläutert, eine vertiefte technische Darstellung erfolgt dabei aus Gründen des Wettbewerbschutzes üblicherweise aber nicht.

Derzeit sind Kraftstoffeinsparungen von 20% durch den Einsatz von Hybridbussen des Herstellers VOLVO mit einer parallelen Antriebsstrangauslegung möglich. Serielle Hybridbusse von EvoBus weisen dagegen nur Einsparungen von etwa 13% aus. Die parallelen Hybridbusse wurden innerhalb des Messprogramms im vorliegenden Projekt zum Vergleich mit den seriellen Dieselhybridbussen von EvoBus hinsichtlich der Kraftstoffreduzierung untersucht. Die durchschnittlichen Einsparungen fallen somit um 7 Prozentpunkte höher aus als die Einsparung der Hybridbusse mit serielltem Antriebstrang. Im Projektverlauf hat sich damit gezeigt, dass der

technisch wesentlich komplexere serielle Hybridantriebsstrang gegenüber dem parallelen Hybridantrieb geringere Einspareffekte mit sich bringt.

Selbstverständlich werden aber auch die von weiteren Herstellern erreichten Entwicklungen bei der HOCHBAHN, meist im unmittelbaren fachlichen Austausch, reflektiert. Der bereits bestehende Austausch mit Verkehrsunternehmen und Busherstellern im Rahmen der VDV-Plattform Elektrobusse sowie der Plattform Innovative Antriebe Bus des BMUB und des BMVI wird auch über die Projektlaufzeit hinaus weiterverfolgt. Auch wird durch Weiterführung der Datenbereitstellung für die Begleitforschung der Erkenntnisgewinn gerade mit Blick auf die Langzeiterfahrung ausgebaut.

V.3 Veröffentlichung von Ergebnissen

Gemäß einer Absprache mit EvoBus wurde bislang auf eine eigene oder gemeinsame Veröffentlichung der Ergebnisse aus der Erprobung von seriellen Hybridbussen bei der HOCHBAHN bisher verzichtet.

VI Berichtsblatt

| | | | |
|---|---|--|------------------|
| 1. ISBN oder ISSN | entfällt | 2. Berichtsart | Schlussbericht |
| 3a. Titel des Berichts | Modellregion Elektromobilität Hamburg: Erprobung und betriebliche und technische Optimierung der Dieselhybridbusse bei der HOCHBAHN - Schlussbericht - | | |
| 3b. Titel der Publikation | Erprobung und betriebliche und technische Optimierung der Dieselhybridbusse bei der HOCHBAHN | | |
| 4a. Autoren des Berichts | Dr. Philipp Krüger, Sönke Hartnuß, Dr. Christian Priemer, Jörn Fischer, Christian Mildner, Christian Nitz, Falko Maxin, Christina Heidrich et al. | 5. Abschlussdatum des Vorhabens | 31.12.2013 |
| | | 6. Veröffentlichungsdatum | Noch offen |
| 4b. Autoren der Publikation | entfällt | 7. Form der Publikation | Noch offen |
| | | 9. Berichtsnummer der durchführenden Institution | entfällt |
| 8. Durchführende Institution(en) | Hamburger Hochbahn AG Steinstraße 20 20095 Hamburg Telefon: 040 3288 4475 Fax: 040 3288 3538 http://www.hochbahn.de | 10. Förderkennzeichen | 03EM0202 |
| | | 11a. Seitenzahl Bericht | |
| | | 11b. Seitenzahl Publikation | Noch offen |
| 13. Fördernde Institution (Name, Adresse) | Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI) Invalidenstr. 44 10115 Berlin | 12. Literaturangaben | Keine |
| | | 14. Tabellen | |
| | | 15. Abbildungen | |
| 16. Zusätzliche Angaben keine | | | |
| 17. Vorgelegt bei (Titel, Ort, Datum) Technische Informationsbibliothek (TIB), Welfengarten 1B, 30167 Hannover http://www.tib.uni-hannover.de | | | |
| 18. Kurzfassung <p>Im Rahmen des vom Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung geförderten Vorhabens wurden fünf serielle Dieselhybridbusse des Herstellers EvoBus von der Hamburger Hochbahn AG (HOCHBAHN) im Liniendienst erprobt. Bis Ende Dezember 2013 wurden insgesamt 485.000 Kilometer zurückgelegt im betrieblichen Einsatz zurückgelegt. Im Vorhabenzeitraum konnten durch die betriebliche und technische Erprobung umfassende Langzeiterfahrungen zum Einsatz der Dieselhybridbusse gesammelt werden. Der durchschnittliche Treibstoffverbrauch konnte im Vergleich zu einem Dieselbus mit Verbrennungsmotor um 13% gesenkt werden. Zudem konnte durch die Erstellung eines Simulationstools die betrieblichen und linienbezogenen Rahmenbedingungen identifiziert werden, die bei der Senkung der Treibstoffverbräuche besonders förderlich sind. Die Auswertung der Ergebnisse des Vorhabens bildet somit eine valide Ausgangsbasis zur Ausweitung des Einsatzes von Hybridtechnologie bei der HOCHBAHN.</p> | | | |
| 19. Schlagwörter | Serieller Hybridbus, Deselektischer Bus, Innovative Antriebe | | |
| 20. Verlag | Nicht zutreffend | 21. Preis | Nicht zutreffend |

VII Document Control Sheet

| | | | |
|--|---|---------------------------------|----------------|
| 1. ISBN or ISSN | Not applicable | 2. Type of report | Final report |
| 3a. Report title | Modellregion Elektromobilität Hamburg: Erprobung und betriebliche und technische Optimierung der Dieselhybridbusse bei der HOCHBAHN - Schlussbericht - | | |
| 3b. Title of the publication | Erprobung und betriebliche und technische Optimierung der Dieselhybridbusse bei der HOCHBAHN | | |
| 4a. Author(s) of the report | Dr. Philipp Krüger, Sönke Hartnuß, Dr. Christian Priemer, Jörn Fischer, Christian Mildner, Christian Nitz, Falko Maxin, Christina Heidrich et al. | 5. End of project | 31.12.2013 |
| | | 6. Publication date | Tbc |
| 4b. Author(s) of the publication | Not applicable | 7. Form of publication | Tbc |
| | | 9. Originator's report no. | Not applicable |
| 8. Performing organization(s) | Hamburger Hochbahn AG Steinstraße 20 20095 Hamburg Telefon: 040 3288 4475 Fax: 040 3288 3538 http://www.hochbahn.de | 10. Reference no. | 03EM0202 |
| | | 11a. No. of pages (report) | |
| | | 11b. No. of pages (publication) | Tbc |
| 13. Sponsoring agency Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI) Invalidenstr. 44 10115 Berlin | | 12. No. of references | None |
| | | 14. No. of tables | |
| | | 15. No. of figures | |
| 16. Supplementary notes: None | | | |
| 17. Presented at (title, place, date) Technische Informationsbibliothek (TIB) [German National Library of Science and Technology], Welfengarten 1B, 30167 Hannover (Germany) http://www.tib.uni-hannover.de | | | |
| 18. Abstract During the project funded by the Federal ministry for transportation and digital infrastructure five serial diesel hybrid buses from the manufacturer EvoBus could be deployed in line service by the Hamburger Hochbahn AG (HOCHBAHN). 485.000 kilometers could be driven until the end of 2013. Comprehensive long-term experience could be collected by the operational and technical testing with the deployment of diesel hybrid buses. The average fuel consumption was reduced by 13% compared to a diesel bus with internal combustion engine. In addition the operational and line related boundary conditions could be identified by creation of a simulation tool, which are particularly beneficial in reducing the fuel consumption. The evaluation of the results of the project constitutes a valid basis for extending the use of hybrid technology in the HOCHBAHN. | | | |
| 19. Key words | Serial Hybrid Bus, Diesel electric bus, innovative power trains | | |
| 20. Publisher | Not applicable | 21. Price | Not applicable |