

HELD

Hamburger Elektrobus Demonstration

Schlussbericht

Förderkennzeichen	16EM2058-1
Projektzeitraum	01.01.2014 – 31.12.2017
Zuwendungsempfänger	Hamburger Hochbahn AG
Projektverantwortlicher	Michael Heidrich

Juni 2018

Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Autor.

Inhaltsverzeichnis

1 Zusammenfassung	6
2 Zielsetzung des Verbundprojektes	6
2.1 Projektbeteiligte	7
2.2 Ziele.....	10
2.3 Aufgabenstellung	10
2.4 Planung und Ablauf des Vorhabens.....	11
3 Ausführliche Darstellung der erzielten Ergebnisse des Verbundprojektes.....	12
3.1 Arbeitspaket 1 - Erprobung Plug-In Hybridbus.....	13
AP 1.1 Technische Vorbereitung PHEV (FFG)	13
AP 1.2 Beschaffung und Inbetriebnahme PHEV (FFG)	13
AP 1.3 Linieneinsatz PHEV (HOCHBAHN)	14
AP 1.4 Technische Evaluation und Optimierung PHEV (FFG)	15
AP 1.5 Aus- und Weiterbildung (FFG und HOCHBAHN)	16
3.2 Arbeitspaket 2 - Erprobung Batteriebus.....	17
AP 2.1 Technische Vorbereitung BEV (FFG)	17
AP 2.2 Beschaffung und Inbetriebnahme BEV (FFG).....	17
AP 2.3 Linieneinsatz BEV (HOCHBAHN).....	18
AP 2.4 Technische Evaluation und Optimierung BEV (FFG)	20
AP 2.5 Aus- und Weiterbildung BEV (FFG und HOCHBAHN)	21
3.3 Arbeitspaket 3 – Infrastruktur (HOCHBAHN)	22
AP 3.1 Definition und technische Vorbereitung Infrastruktur	22
AP 3.2 Beschaffung und Inbetriebnahme Infrastruktur	22
AP 3.3 Laden auf Haltestellen.....	23
AP 3.4 Laden auf dem Busbetriebshof	23
AP 3.5 Technische Evaluation und Optimierung der Ladeinfrastruktur.....	24
3.4 Arbeitspaket 4 - Evaluation	24
AP 4.1 Datenerfassung (ika)	24
AP 4.2 Energiebedarf und Emissionen (ika)	26
AP 4.2.1 Energiebedarf.....	26
AP 4.2.2. CO ₂ -Emissionen (Tank-to-Wheel-Betrachtung)	32
AP 4.2.3 Lärmemissionen	33
AP 4.3 Betriebliche Leistungsfähigkeit, Wirtschaftlichkeit (HOCHBAHN, ika).....	33
AP 4.4 Übertragbarkeit auf andere Linien bzw. Linienbündel (HOCHBAHN).....	37
AP 4.5 Administrative Aufgaben, Kommunikation (hySOLUTIONS).....	42
AP 4.5.1 Administrative Aufgaben	42
AP 4.5.2 Kommunikation.....	43

4. Wesentliche Abweichungen zum Arbeitsplan	48
5. Vergleich der Projektergebnisse zum internationalen Stand der Technik.....	48
6. Zukunftsaussichten und weiterer F&E-Bedarf	48
7. Beitrag zu den förderpolitischen Zielen des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB)	49
8. Veröffentlichung von Ergebnissen	49

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1: Arbeitspakete	11
Abb. 2: Streckenskizze der Innovationslinie 109	12
Abb. 3: Eingesetzte Fahrzeuge auf der Innovationslinie 109.....	13
Abb. 4: Laufleistung der Plug-in-Busse über die Projektlaufzeit betrachtet	15
Abb. 5: Verfügbarkeit der Plug-in-Busse über die gesamte Projektlaufzeit	15
Abb. 6: Laufleistung der Batteriebusse über die Projektlaufzeit betrachtet.....	18
Abb. 7: Verfügbarkeit der BEV über die gesamte Projektlaufzeit.....	20
Abb. 8: Lademast an der Endhaltestelle Elektrobusterminal	22
Abb. 9: Streckenbezogener Energiebedarf der Einzelfahrten der Volvo Fahrzeuge über der Aussentemperatur.....	27
Abb. 10: Streckenbezogener Energiebedarf der verschiedenen Fahrzeugtypen	28
Abb. 11: Streckenbezogener Energiebedarf der verschiedenen Fahrzeugtypen nach Energieträgern	29
Abb. 12: Elektrische Fahrstrecke der Volvo Fahrzeuge während den Einzelfahrten.....	31
Abb. 13: Ladegradverlust der Solaris Fahrzeuge während den Einzelfahrten.....	32
Abb. 14: Ladegrad der Volvo Fahrzeuge während den Einzelfahrten	35
Abb. 15: Simulierter Streckenenergiebedarf der batterieelektrischen Fahrzeuge.....	39
Abb. 16: Eröffnungsveranstaltung Innovationslinie 109	43
Abb. 17: Busflotte der HOCHBAHN mit innovativen Antrieben	44
Abb. 18: Batteriebus unterwegs in Hamburg (Quelle:SOLARIS).....	45
Abb. 19: Animation zur Antriebstechnologie des Plug-in-Busses (Innovationslinie 109).....	46
Abb. 20: Vorder- und Rückseite des technischen Datenblattes zum Batteriebus.....	46
Abb. 21: Hinweis auf HOCHBAHN Website zum Besucherprogramm	47
Abb. 22: Besucherprogramme zur Innovationslinie 109	47

1 Zusammenfassung

Die Bundesregierung hat sich zum Ziel gesetzt, den Endenergieverbrauch bis 2020 im Verkehrssektor um rund 10 % und bis 2050 um rund 40 % gegenüber 2005 zu reduzieren. Ohne einen wachsenden Einsatz elektrisch angetriebener Fahrzeuge werden diese klima- und energiepolitischen Ziele der Bundesregierung jedoch kaum erreicht werden. Der Erprobung und Weiterentwicklung von Fahrzeugen mit innovativen Antrieben kommt folglich eine zentrale Bedeutung zu. Flankierend hierzu ist die Strategie der HOCHBAHN für ihre Busflotte darauf ausgerichtet, ab 2020 in wachsendem Umfang Busse mit emissionsarmen oder vollständig emissionsfreien Antrieben einzusetzen.

Die Ergebnisse des Vorhabens HELD zeigen, dass der Einsatz von Elektrobussen mit Gelegenheitsladen und dezentraler Ladeinfrastruktur in Hamburg grundsätzlich technisch beherrschbar und mit einer akzeptablen Zuverlässigkeit möglich ist.

Mit den vorliegenden Ergebnissen des Projektes HELD wurden wichtige strategische Optionen für die zukünftige E-Bus-Strategie der HOCHBAHN erarbeitet. Ab 2019 wird die HOCHBAHN 60 Batteriebusse in zwei Tranchen beschaffen und hierbei das Konzept des reinen Depot-Ladens über Nacht auf dem Busbetriebshof verfolgen. Je nach Entwicklung der Batteriekapazität am Markt wird für die vollständige Elektrifizierung des Busnetzes dann die im Rahmen des Projekts erprobte und als geeignet bewertete Technologie des dezentralen Ladens zum Einsatz kommen. Plug-in-Busse sind aufgrund der zu kleinen Batteriekapazität und des immer noch anteilig genutzten fossilen Dieseltreibstoffes keine Option mehr.

2 Zielsetzung des Verbundprojektes

Stetig steigendes Verkehrswachstum und damit einhergehende steigende Emissionen von beispielweise CO₂ prägen den Straßenverkehr in Deutschland. Der öffentliche Personennahverkehr mit Linienbussen trägt wegen des günstigen Verhältnisses von Energieeinsatz zu den beförderten Personen zwar schon heute zur Entlastung unserer Städte von klima- und gesundheitsschädlichen Emissionen bei. Vor dem Hintergrund der auch gerade zur Zeit geführten Debatte um überhöhte Schadstoffwerte, vor allem Stickoxid, sind Bushersteller und Verkehrsunternehmen jedoch gefordert, noch emissionsärmere Fahrzeuge zu entwickeln und einzusetzen, um die Luftqualität vor allem in Städten weiter zu verbessern und zum Klimaschutz beizutragen. Die Umstellung auf elektrische Antriebe ist hierbei ein wichtiger Baustein.

Einhergehend mit der politische Vorgabe des Senates der Freien und Hansestadt Hamburg, ab 2020 nur noch emissionsfreie Busse zu beschaffen, ist das Ziel der Zusammenarbeit der Projektpartner, Busse mit emissionsfreien Antrieben möglichst bald zur Marktreife zu bringen.

2.1 Projektbeteiligte

Als zweitgrößtes Nahverkehrsunternehmen Deutschlands ist die HOCHBAHN Antragstellerin dieses Vorhabens und arbeitet in diesem Projekt mit VOLVO und SOLARIS als Fahrzeuglieferanten eng zusammen. HOCHBAHN hat sowohl die Fahrzeuge als auch die dazu gehörige, von Siemens entwickelte Ladeinfrastruktur beschafft.

VOLVO ist der Lieferant für die drei Plug-in Hybrid Electric Vehicle (PHEV), SOLARIS für die drei Battery Electric Vehicle (BEV). Bei Beantragung des Vorhabens wurde davon ausgegangen, dass VOLVO auch die BEV liefern würde. Im Rahmen eines Ausschreibungsverfahrens konnte sich jedoch SOLARIS durchsetzen.

Die wissenschaftliche Begleitung, vor allem die Ermittlung der Klimaschutzeffekte, wird durch das Institut für Kraftfahrzeuge der RWTH Aachen University (ika) durchgeführt. Hierfür hat das ika ein eigenes Fördervorhaben unter dem Förderkennzeichen 16EM2058-2 eingereicht.

Alle Partner haben ihre gegenseitigen Rechte und Pflichten im Rahmen einer Kooperationsvereinbarung niedergelegt.

Hamburger Hochbahn AG

Die 1911 gegründete Hamburger Hochbahn AG (HOCHBAHN) erbringt rund 50 Prozent der gesamten Nahverkehrsleistung im Hamburger Verkehrsverbund (HVV). Mit ca. 5.000 Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern gehört sie zu den größten Arbeitgebern Hamburgs und realisiert auf vier U-Bahn-Linien und 111 Buslinien ein zuverlässiges und umweltfreundliches Mobilitätsangebot. Als innovatives Dienstleistungsunternehmen stehen bei der HOCHBAHN die Fahrgäste und ihre Zufriedenheit im Mittelpunkt. Verlässlichkeit, Qualität und Wirtschaftlichkeit bilden die Basis der täglichen Arbeit. Schon heute befördert sie täglich weit über eine Million Fahrgäste und ist als größtes Verkehrsunternehmen im Hamburger Verkehrsverbund wichtiger Partner der Freien und Hansestadt Hamburg. Um die Mobilität in der wachsenden Metropole und die Lebensqualität in den innerstädtischen Quartieren auch für die Zukunft zu sichern, arrangiert die HOCHBAHN integrierte Mobilitätsangebote aus einer Hand und setzt als Vorreiter bei der Entwicklung und Erprobung innovativer Antriebe zukunftsweisende Impulse.

VOLVO Busse Deutschland

Die VOLVO Busse Deutschland GmbH (VOLVO) ist eine Tochter der VOLVO Bus Corporation. VOLVO Bus Corporation ist ein traditioneller Busersteller aus Schweden mit einem hohen Anspruch an den Umweltschutz und eine nachhaltige Produktion von Fahrzeugen. VOLVO produziert seit 1928 Omnibusse. Die VOLVO Bus Corporation ist heute einer der größten Busersteller der Welt mit einer Produktion von rund 10.000 Einheiten im Jahr. Die Produktionsstandorte sind auf der ganzen Welt verteilt: Schweden, Polen, USA, Kanada, Mexiko, Brasilien, China und Indien. Als weltweit erster Hersteller schlossen sich die VOLVO Group und VOLVO Bus Corporation dem Programm „Climate Savers“ des World Wide Fund for Nature

(WWF) an. Bei dieser Zusammenarbeit verpflichtet sich der Hersteller zur Reduzierung der CO₂-Emissionen aller bis 2014 gebauten Baumaschinen, Busse und Lastwagen.

In Projekt HELD ist VOLVO Lieferant der Plug-in-Busse und arbeitete eng mit Siemens zusammen, um ein optimales Zusammenwirken der Busse und der Ladeinfrastruktur zu gewährleisten.

Solaris Bus & Coach S.A.

Solaris Bus & Coach S.A. (SOLARIS) ist ein führender europäischer Anbieter innovativer Nahverkehrsfahrzeuge für die Straße und die Schiene. Seit Produktionsbeginn 1996 hat das von Krzysztof und Solange Olszewski gegründete Familienunternehmen über 16.000 Busse an Kunden in 32 Länder ausgeliefert. SOLARIS hat sich auf moderne Stadt- und Überlandlinienbusse spezialisiert und bietet diese mit verschiedensten Antrieben an. Zum Einsatz kommen auch emissionsfreie Oberleitungsbusse und Elektrobusse.

Im Jahr 2016 hat SOLARIS drei Batteriebusse mit einer Länge von 12 Meter an die HOCHBAHN geliefert und ist somit Teil des Projekts HELD geworden.

Siemens AG Deutschland

Die Siemens AG (Berlin und München) ist ein führender internationaler Technologiekonzern, der seit 170 Jahren für technische Leistungsfähigkeit, Innovation, Qualität, Zuverlässigkeit und Internationalität steht. Das Unternehmen ist weltweit aktiv, und zwar schwerpunktmäßig auf den Gebieten Elektrifizierung, Automatisierung und Digitalisierung. Siemens ist zudem einer der größten Hersteller energieeffizienter ressourcenschonender Technologien. Das Unternehmen ist einer der führenden Anbieter effizienter Stromerzeugungs- und Stromübertragungslösungen, Pionier bei Infrastrukturlösungen sowie bei Automatisierungs-, Antriebs- und Softwarelösungen für die Industrie. Im Geschäftsjahr 2017, das am 30. September 2017 endete, erzielte Siemens einen Umsatz von 83 Milliarden Euro und einen Gewinn nach Steuern von 6,2 Milliarden Euro. Ende September 2017 hatte das Unternehmen weltweit rund 377.000 Beschäftigte.

Die Division Mobility ist ein international führender Anbieter von Produkten, Systemen und Lösungen, die den effizienten, sicheren und umweltfreundlichen Transport von Menschen und Gütern ermöglichen. Die geschäftlichen Aktivitäten umfassen Schienenfahrzeuge, Bahnautomatisierung, Straßenverkehrstechnik und Verkehrstelematiksysteme ebenso wie Bahnelektrifizierung. Das Serviceangebot der Division Mobility steigert sowohl die Verfügbarkeit der Fahrzeuge als auch die der Verkehrsinfrastruktur. Das umfassende Portfolio wird darüber hinaus um die Kompetenz bei der Errichtung schlüsselfertiger Anlagen und um zielgerichtete Finanzierungslösungen ergänzt. Die Division Mobility verbindet Innovationen mit umfassendem Branchenknowhow, mehr als 160 Jahren Expertise im Verkehrswesen, ein globales Netzwerk anerkannter Experten in mehr als 40 Ländern mit dem stabilen finanziellen Fundament der Siemens AG.

Fahrzeugwerkstätten Falkenried GmbH (FFG)

Die Fahrzeugwerkstätten Falkenried GmbH (FFG) ist ein 100%-iges Tochterunternehmen der HOCHBAHN und stellt durch ihre Dienstleistungen die Instandhaltung der durch die HOCHBAHN im Hamburger Verkehrsverbund betriebenen Busflotte sicher. Die technischen Kompetenzen der FFG reichen über das reine Flottenmanagement und die Instandhaltung der Fahrzeugtechnik hinaus. Als Vorreiter im Umgang mit innovativer Fahrzeugtechnologie ist die FFG auch strategischer Partner der HOCHBAHN bei der Erprobung von Bussen mit neuen Antriebstechnologien. Zudem entwickelt die FFG Servicekonzepte für die Elektromobilität, ein Schwerpunkt ist hier die Konstruktion von Dacharbeitsplätzen.

Ika Institut für Kraftfahrzeuge, RWTH Aachen University

Das Institut für Kraftfahrzeuge (ika) der RWTH Aachen University unter Leitung von Prof. Dr. Lutz Eckstein ist das europaweit führende fahrzeugtechnische Institut, das sämtliche Bereiche des Kraftfahrzeugs abdeckt. Bei der Gestaltung innovativer Konzepte kommen virtuelle Methoden und reale Absicherung eng vernetzt zum Einsatz. Ein spezieller Fokus liegt auf zukunftsweisenden Methoden zur anforderungsgerechten Konzeption und Auslegung innovativer Systeme und Komponenten und der Integration in das Gesamtsystem. Das zukünftige Kraftfahrzeug wird dabei als integraler Bestandteil einer energetisch sowie informatorisch vernetzten, nachhaltigen Mobilität betrachtet. Das Institut für Kraftfahrzeuge gliedert sich in zehn Forschungsbereiche, die den Schwerpunkt im Bereich der Lehre sowie der öffentlichen und industriellen Forschungsprojekte festlegen. Die an den klassischen Fahrzeugdomänen orientierten Bereiche Fahrwerk, Karosserie, Antrieb, Elektrik/Elektronik und Fahrerassistenz arbeiten eng mit den übergreifenden Bereichen Strategie und Beratung, Fahrzeugkonzepte, Akustik, Thermomanagement sowie Kraftfahrzeug-Systembewertung zusammen.

hySOLUTIONS GmbH

Zu den wesentlichen Aufgaben der Gesellschaft gehört die Unterstützung der Freien und Hansestadt Hamburg bei der Umsetzung ihrer Klimaschutzziele. Seit 2009 nimmt hySOLUTIONS darüber hinaus die Aufgabe einer Koordinierungsstelle für Elektromobilität in Hamburg wahr. In dieser Funktion tritt hySOLUTIONS als vermittelnde Instanz auf, die gezielt Kooperationspartner aus den Bereichen Elektromobilität, Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie, neue Mobilitätsdienstleistungen und alternative Kraftstoffe zusammenführt und ihren Projekten die nötige Unterstützung auf politischer Ebene sichert. Daneben ist die Akquisition von Förderzuwendungen aus nationalen wie europäischen Programmen ein Schwerpunkt ihrer Arbeit.

In diesem Vorhaben unterstützt hySOLUTIONS die HOCHBAHN bei administrativen und auf die Förderung bezogenen Aufgaben.

2.2 Ziele

Das Ziel des Vorhabens HELD bestand darin, Bussen mit vollständig emissionsfreien Antrieben durch ihre Erprobung im Realbetrieb unter wissenschaftlicher Begleitung möglichst bald zur Marktreife zu verhelfen. Der Grund für das Engagement der HOCHBAHN ist nicht zuletzt die politische Vorgabe des Senates der Freien und Hansestadt Hamburg, ab 2020 nur noch emissionsfreie Busse zu beschaffen.

Ausgehend von den bisherigen positiven Erfahrungen bei der HOCHBAHN mit Parallelhybrid-Diesel-Bussen von VOLVO beinhaltet das Vorhaben die Weiterentwicklung von Linienbussen über Plug-In-Busse zu rein elektrischen Batteriebussen in folgendem zeitlichen Ablauf:

- **Ab Oktober 2014:** Aufbau der dezentralen Ladesysteme für Plug-In-Busse wie auch Batteriebusse. Beide Fahrzeugtypen können ergänzend zur Ladung der Batterien auf den Betriebshöfen zusätzlich Energie über externe Ladeeinrichtungen an den jeweiligen End- bzw. Startpunkten der Linie beziehen.
- **Im Winter 2014/2015:** Beginn der Erprobung von drei Hybrid-Bussen von VOLVO, die zusätzlich über eine Plug-In-Funktion verfügen, um die Hochvoltbatterien extern (sowohl zentrale, kabelgebundene Ladung als auch dezentrale Ladung über einen Pantographen möglich) mit Energie zu versorgen.
- **Ab Mitte 2016:** Aufnahme der Erprobung von drei rein elektrisch betriebenen Bussen von SOLARIS, deren Energieversorgung vollständig aus der Batterie erfolgt. Diese Fahrzeuge werden sowohl auf der Strecke als auch auf dem Betriebshof über Nacht geladen.

Die Beschaffung der Fahrzeuge und der Ladeinfrastruktur erfolgte durch die HOCHBAHN und wurde technisch durch die FFG begleitet. Seitens der Industrie waren VOLVO und SOLARIS als Hersteller bei der technischen Optimierung und Weiterentwicklung der Plug-in-Busse bzw. der Batteriebusse und Siemens für die Ladeeinrichtungen eingebunden.

2.3 Aufgabenstellung

Die enge Zusammenarbeit von HOCHBAHN und den Fahrzeug- und Infrastrukturherstellern ist im Rahmen dieses Projektes besonders bedeutsam, da sie zur zielgerichteten Weiterentwicklung von PHEV sowie BEV maßgeblich beiträgt. Zudem stand das Projekt vor der Herausforderung, das automatisierte Zusammenspiel von Fahrzeug und Infrastruktur mit zwei unterschiedlichen Fahrzeugherstellern auszutesten. Ziel war es, herauszufinden, ob die dezentrale Ladetechnologie im Hinblick auf die Anforderungen der HOCHBAHN an ein zukünftiges Serienprodukt ein zufriedenstellendes Maß an Zuverlässigkeit erreichen kann.

Mit der erfolgreichen Erprobung der Fahrzeuge im realen Betrieb wurden wichtige Erkenntnisse zur Einschätzung des künftigen Marktes für innovative Linienbusse generiert. Diese sind unter anderem:

- Szenarien zu den künftigen Kosten für die Investition in elektrisch angetriebene Busse verschiedener Technologiestufen,

- Hinweise zu den Kosten für die Ladeinfrastruktur entsprechend dem diesem Projekt zugrundeliegenden Versorgungskonzept für Busse und zum Umfang der benötigten Ausstattung, um einen kosteneffizienten Betrieb von Elektrobussen zu gewährleisten,
- Erkenntnisse zum Energiebedarf der Fahrzeuge nach Typ, Jahreszeiten und Linienanforderungen als Kriterium für die Auswahl geeigneter Linien bzw. Linienbündel für künftige Einsätze von Elektrobussen,
- Aussagen zum Gesamtinvestment bei der Übertragung der Daten aus der Erprobung auf einzelnen Linien auf gesamte oder anteilige Liniennetze in Ballungsräumen und ggf. zum Priorisieren von Linien mit besonders hoher Eignung,
- Validierte Aussagen zu den Potenzialen elektrischer Busantriebe bei der Reduzierung von Emissionsbelastungen in Städten als Vorgabe für künftige Investitionsentscheidungen durch die Städte und Gemeinden als Gesellschafter öffentlicher Verkehrsunternehmen,
- Hinweise zur Akzeptanz entsprechender Fahrzeuge sowie der dezentralen Ladeinfrastruktur bei den Fahrgästen, den Mitarbeitern und den politischen Entscheidern.

Die Ergebnisse des Vorhabens sollen eine Hilfestellung bei der Bewertung des Einsatzes von Elektrobussen in Städten geben und künftige Systementscheidungen für einen klimaschonenden Nahverkehr mit Bussen argumentativ unterlegen.

2.4 Planung und Ablauf des Vorhabens

Das Arbeitsprogramm für das Projekt setzt sich aus insgesamt 20 Leistungspaketen zusammen, die sukzessive umgesetzt wurden. Bei ihrer Umsetzung wurden die Aktivitäten in den einzelnen Arbeitspaketen regelmäßig darauf geprüft, ob sie noch im Plan sind und nach Bedarf Maßnahmen zum Erreichen der fachlichen und administrativen Ziele definiert.

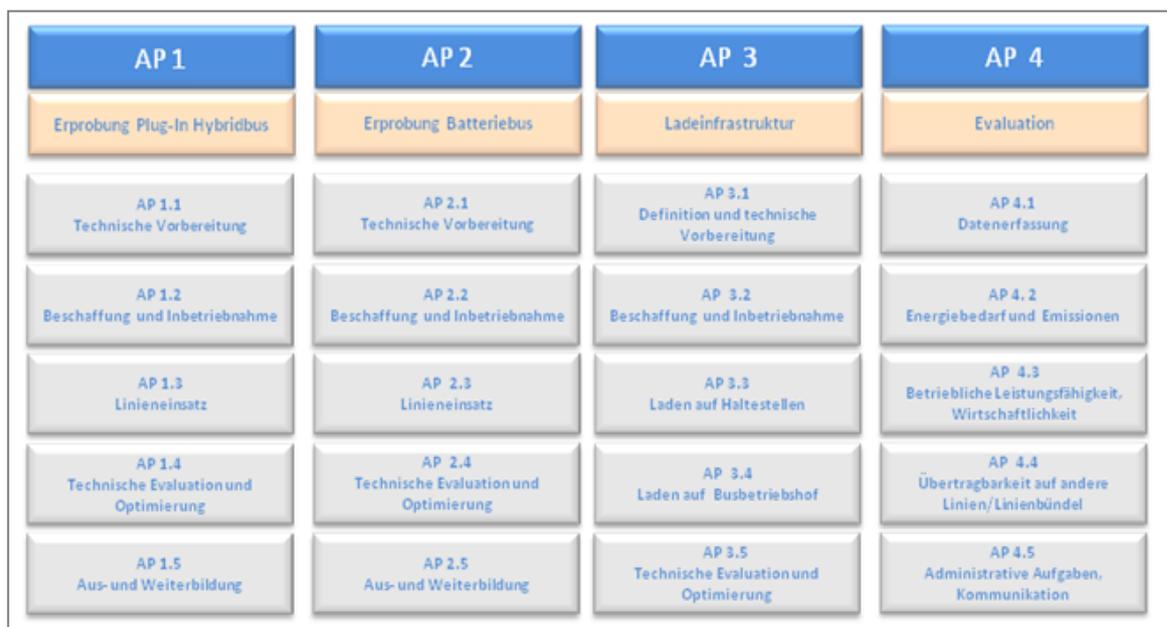
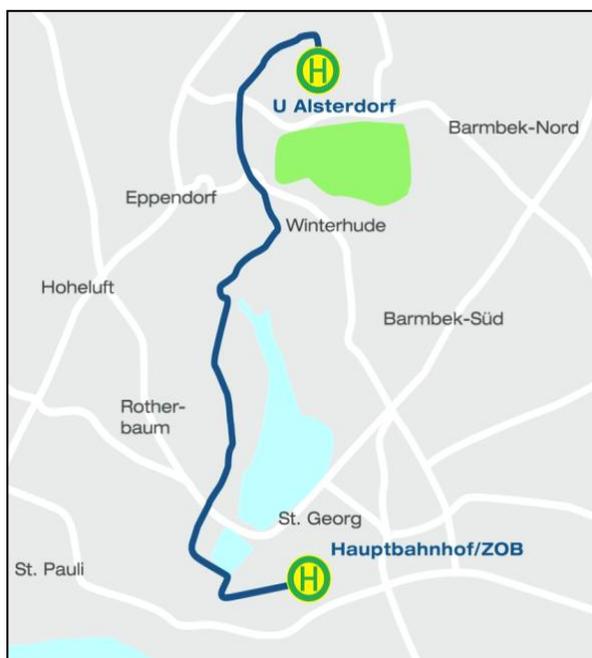


Abb. 1: Arbeitspakete

Die wesentlichen Aufgaben des Arbeitsprogramms waren die praktische Erprobung der innovativen Busse im Linienbetrieb einschließlich ihrer technischen und betrieblichen Weiterentwicklung im Abgleich mit der Ladeinfrastruktur. Daran knüpften Untersuchungen zu den Klimaschutzeffekten, der Übertragbarkeit von der ersten Erprobungslinie auf andere Linien bzw. regionale Linienbündel sowie zur Wirtschaftlichkeit des Systems an.

3 Ausführliche Darstellung der erzielten Ergebnisse des Verbundprojektes

Für den vergleichenden Testeinsatz verschiedener innovativer Antriebstechniken bei der HOCHBAHN wurde die vorhandene StadtBus-Linie 109 ausgewählt. Die im Weiteren Projektverlauf als Innovationslinie 109 bezeichnete Linie beginnt im Stadtzentrum am Elektrobusterminal in direkter Nähe zum Zentralen Omnibusbahnhof (ZOB) und Hauptbahnhof.



Von dort verläuft sie durch die Innenstadt über den Rathausmarkt und weiter westlich der Alster Richtung Norden u.a. durch die Stadtteile Rotherbaum und Winterhude bis zur Endhaltestelle an der U-Bahn-Station Alsterdorf. Die Länge der Innovationslinie 109 beträgt knapp 10 Kilometer. In der Hauptverkehrszeit wird die Linie im 6/7-Minuten-Takt bedient. Ungewöhnlich im Hamburger Linienverkehr ist, dass ein Mischeinsatz von Stadtbussen (12m Länge) bzw. Gelenkbussen (18m bzw. 18,75m Länge) stattfindet. Durch den dichten Takt ist gewährleistet, dass es in der Hauptverkehrszeit bei den Stadtbusumläufen nicht zu Kapazitätsproblemen kommt.

Abb. 2: Streckenskizze der Innovationslinie 109

An beiden Endhaltestellen am Elektrobusterminal sowie U Alsterdorf wurden jeweils zwei Lademasten zur Schnellladung (High-Power-Charging) installiert. Die maximale Ladeleistung der Lademasten beträgt jeweils 300 kW, die Ladezeit beträgt je nach Ladezustand der Fahrzeugbatterien maximal 7 Minuten.

Seit dem Fahrplanwechsel im Dezember 2014 werden alle HOCHBAHN-Busse mit innovativer Antriebstechnik konzentriert auf der Linie 109 eingesetzt. Zugleich erfolgt ein ausgewählter Einsatz von konventionellen Dieselnbussen mit aktueller EURO-VI-Motortechnik, um Vergleichswerte hinsichtlich des langfristigen Verbrauches auf der Linie zu ermitteln.

Für die Bedienung der Innovationslinie 109 stehen bzw. standen schwerpunktmäßig folgende Fahrzeugtypen zur Verfügung:

Fahrzeug	Anzahl	Hersteller	Länge (m)	In Betrieb seit	Förderprojekt
Plug-in-Bus (PHEV)	3	VOLVO	12	2014	HELD
Batteriebus (BEV)	3	SOLARIS	12	2016	HELD
Brennstoffzellenbus	4	EvoBus	12	2011	NaBuZ demo
Batteriebus mit Brennstoffzelle als Range-Extender	2	SOLARIS	18,75	2014	NaBuZ demo
Serieller Dieselhybridbus	5	EvoBus	18	2010/2011 (bis 2016)	EBTO
Paralleler Dieselhybridbus	12	VOLVO	12	2014	ErPaD
Paralleler Dieselhybridbus	15	VOLVO	18	2014	ErPaD
Dieselbus EURO-VI (Ref.fahrzeug)	2	EvoBus	12	2014	/
Dieselbus EURO-VI (Ref.fahrzeug)	2	EvoBus	18	2014	/

Abb. 3: Eingesetzte Fahrzeuge auf der Innovationslinie 109

3.1 Arbeitspaket 1 - Erprobung Plug-In Hybridbus

AP 1.1 Technische Vorbereitung PHEV (FFG)

Ausgehend von den bisherigen Erfolgen der Busse mit parallel-elektrischem Hybridantrieb (Hybrid Electric Vehicle, HEV) im Linieneinsatz bei der HOCHBAHN hat der Fahrzeughersteller VOLVO für den Einsatz auf der Innovationslinie 109 einen Plug-In-Hybridbus (Plug-In Hybrid Electric Vehicle, PHEV) entwickelt. Die im Antriebsstrang implementierte Lithium-Ionen-Batterie (19kWh Gesamtkapazität, davon 9 kWh nutzbar) kann nicht nur durch die Rückgewinnung von Bremsenergie (Rekuperation) sondern auch von außen durch konduktive Ladung über Ladestationen geladen werden. Dieses Fahrzeugkonzept stellt einen weiteren Schritt im Hinblick auf die Erhöhung elektrischer Fahranteile dar.

Die HOCHBAHN, die FFG Fahrzeugwerkstätten Falkenried GmbH (FFG) und der Fahrzeughersteller VOLVO haben die betrieblichen und technischen Anforderungen an die PHEV seit 2013 in intensiven Gesprächen abgestimmt.

AP 1.2 Beschaffung und Inbetriebnahme PHEV (FFG)

Nach der Abstimmung der technischen und betrieblichen Anforderungen an die Fahrzeuge wurden drei PHEV beschafft. Die Anlieferung des ersten Fahrzeuges erfolgte im November 2014, die Lieferung der weiteren zwei Fahrzeuge im Dezember 2014. Alle für die Zulassung erforderlichen Dokumente wurden von VOLVO rechtzeitig vorgelegt, sodass alle drei Fahrzeuge zugelassen werden konnten.

Aufgrund von Abweichungen zwischen dem Bauzustand und den Anforderungen gemäß der Leistungsbeschreibung hat sich die Inbetriebnahme zunächst verzögert. VOLVO hat hier nach der Anlieferung erfolgreich Nacharbeiten vorgenommen. So wurden beispielsweise die Türsteuerung und die Schalterbelegung auf der Instrumententafel angepasst. Weiterhin wurden Softwareupdates bei den Fahrzeugen durchgeführt. Bei dem ersten Fahrzeug wurde zudem die Hochvoltbatterie durch ein neueres Baumuster ersetzt und es wurde das Batteriesteuergerät getauscht.

Bis Ende Dezember 2014 konnten zwei der drei beschafften Fahrzeuge in den Einsatz gehen. Im Februar 2015 waren alle erforderlichen Ausrüstungsarbeiten, wie z.B. der Einbau der Videoüberwachung und des Fahrscheindruckers (EFAD), auch am dritten Fahrzeug abgeschlossen, sodass auch dieses in den Einsatz gehen konnte. Somit sind seit Februar 2015 alle drei Fahrzeuge auf der Innovationslinie 109 im Einsatz.

AP 1.3 Linieneinsatz PHEV (HOCHBAHN)

Die Plug-in und Batteriebusse sind auf dem Busbetriebshof Hummelsbüttel (Lademannbogen 2, 22339 Hamburg) stationiert. Hier sind auch die Brennstoffzellenbusse und Batteriebusse mit Brennstoffzelle als Range-Extender aus dem Projekt NaBuZ demo untergebracht, so dass von diesem Betriebshof aus alle innovativen Fahrzeuge der HOCHBAHN in den Einsatz gehen.

Der Einsatz der parallelen Dieselhybrid- und der Referenzbusse erfolgt von den Betriebshöfen Hummelsbüttel und Langenfelde (Warnstedtstraße 2).

Das Einsatzkonzept für die Plug-in-Busse sah bisher zwei Umläufe montags bis freitags vor (bis zu 16 Stunden Einsatz). An den Wochenendtagen erfolgten in der Regel nur jeweils Umläufe mit ca. acht Stunden Dienstlänge. Darüber hinaus kommen die Plug-in-Busse als Ersatz auch in anderen Fahrzeugumläufen auf der Innovationslinie 109 zum Einsatz. So können mit den PHEV problemlos auch Umläufe der anderen innovativen Busse gefahren werden.

Aufgrund der Inbetriebnahme der neuen Batteriebusse haben mit dem Fahrplanwechsel zum 11. Dezember 2016 die Plug-in-Busse noch mehr Umläufe in den Tagesrand- und Nachtzeiten übernommen, bei gleichzeitig etwas erhöhter Leistungsvorgabe. In diesen Fällen wird fahrplanmäßig nicht mehr die Ladestation am Elektrobusterminal erreicht. In den Tagesrandzeiten wird planmäßig die Linie 109 nur zwischen dem Rathausmarkt und U Alsterdorf bedient. Der elektrische Fahranteil sank dadurch etwas, da die Busse in den genannten Tagesrandzeiten nur U Alsterdorf fahrplanmäßig erreichen. Die bisherigen Plug-in-Bus-Umläufe sind jetzt für die Batteriebusse vorgesehen, da die SOLARIS-Busse die Nachlademöglichkeiten an beiden Endpunkten der Innovationslinie 109 benötigen und nicht notfalls auf Dieselmotorkraftstoff umschalten können. In der Praxis hat es sich ergeben, dass auch die Solaris-Batteriebusse in der Regel die am Rathausmarkt endenden Umläufe bedienen können, sofern eine Ladung am

Endpunkt in U Alsterdorf stattfinden kann. Die Batteriekapazität der Busse stellt sich für diese betrieblichen Fälle als ausreichend dar.

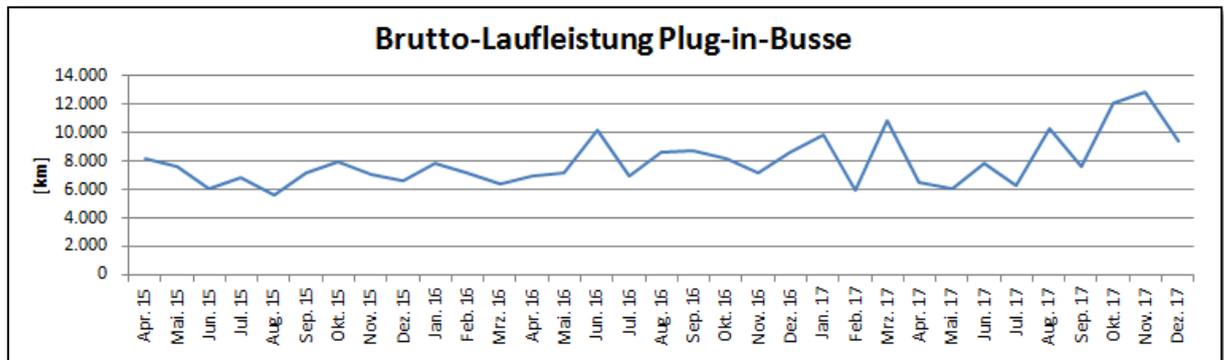


Abb. 4: Laufleistung der Plug-in-Busse über die Projektlaufzeit betrachtet

AP 1.4 Technische Evaluation und Optimierung PHEV (FFG)

Im Rahmen der Erfassung der Betriebsdaten der Fahrzeuge auf der Linie wurden verschiedene Parameter dokumentiert. Hierzu zählte unter anderem auch die Verfügbarkeit. Zur Erfassung der technischen Verfügbarkeit wurde täglich pro Hauptverkehrszeit geprüft, ob das jeweilige Fahrzeug für den Einsatz zur Verfügung stand. Dies war unabhängig davon, ob das Fahrzeug an dem entsprechenden Tag tatsächlich auf der Linie 109 zum Einsatz gekommen ist. Pro Tag wurde die Verfügbarkeit somit für jedes Fahrzeug zweimal erfasst.

Für das Jahr 2015 lag die durchschnittliche Verfügbarkeit der PHEV bei ca. 66 %. Im Jahr 2016 konnte die durchschnittliche Verfügbarkeit durch verschiedene Soft- und Hardware-Updates auf 76 % gesteigert werden. 2017 betrug die durchschnittliche Verfügbarkeit 75 %. Seit der Inbetriebnahme der Fahrzeuge ergab sich somit eine kumulierte Verfügbarkeit von 72 %.

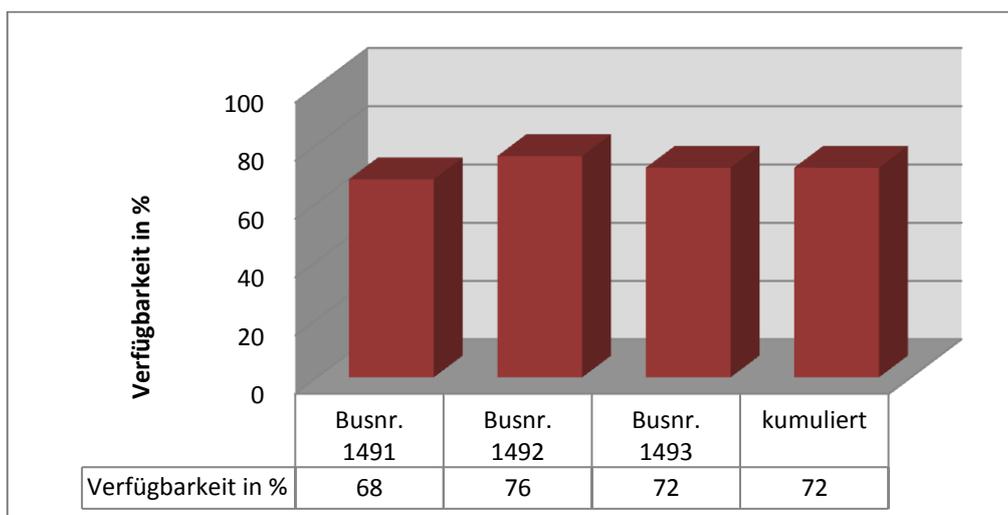


Abb. 5: Verfügbarkeit der Plug-in-Busse über die gesamte Projektlaufzeit

Auftretende technische Probleme wurden dokumentiert, ausgewertet und im Rahmen einer regelmäßigen Kommunikation zwischen VOLVO und der FFG ausgetauscht und diskutiert. Als Ursachen für die Nichtverfügbarkeit der Busse haben sich fahrzeugseitig in den Jahren 2016 und 2017 anders als in 2015 (mit den Fehlerschwerpunkten Türsteuerung, Heizungsanlag, Elektroantrieb) keine konkreten Fehlerschwerpunkte gezeigt. Die festgestellten technischen Probleme waren sehr vielfältig und traten nach deren Beseitigung in der Regel nicht erneut auf. Nachfolgend sind beispielhaft einige der in den Jahren 2016 und 2017 festgestellten Fehler aufgeführt:

- Ladesteckerverriegelung schwergängig,
- Elektrischer Türantrieb defekt,
- Korrosion an Haltern im Starterbatteriefach auf dem Dach,
- Korrosion am Seiten- und Dachrandprofil,
- Sicherung im Hybridsystem zur Ladung der 24V Bordbatterien defekt,
- Defekte Abgasboxen aufgrund einer fehlerhaften Regenerationsstrategie.

AP 1.5 Aus- und Weiterbildung (FFG und HOCHBAHN)

In Vorbereitung auf die Instandhaltung der PHEV durch die FFG wurden von VOLVO folgende fahrzeugspezifischen Lehrgänge für die Mitarbeiter der FFG durchgeführt:

- 5-tägige Ausbildung zum zertifizierten Hybridbus-Techniker,
- 2-tägige Ergänzungsausbildung PHEV,
- 2-tägiger Lehrgang zum Freischalten der Hochvolt-Anlage.

Insgesamt wurden bis zum Ende des Projektes 36 Mitarbeiter zum Hybridbus-Techniker für VOLVO-Fahrzeuge qualifiziert. Diese Mitarbeiter erhielten hierzu zusätzlich eine Ergänzungsausbildung über die Besonderheiten der spezifischen Plug-In-Komponenten. Ferner erhielten weitere Mitarbeiter einen entsprechenden Lehrgang zum Freischalten der Hochvoltanlage. Zudem wurde über den gesamten Zeitraum des Projektes die jährlich erforderliche Wiederholungsschulung für die Hybridbus-Techniker durchgeführt.

Im Rahmen der Ausbildung der Fahrerinnen und Fahrer erfolgt eine Einweisung in das Fahrzeug und die Technik der Ladestation. Zum praktischen Teil der Schulung gehört u. a. das genaue Positionieren des Busses unter der Ladestation. Rund 300 Fahrerinnen und Fahrer des Betriebshofes Hummelsbüttel sind für den Einsatz auf den VOLVO-Plug-In-Bussen ausgebildet. Dies ermöglicht in der Dienstplanung einen flexiblen Einsatz der Mitarbeiter und dadurch einen ganztägigen Betrieb der Plug-In-Fahrzeuge auf der Innovationslinie 109 in zwei Schichten von insgesamt bis zu 16 Stunden. Aufgrund allgemeiner Mitarbeiterfluktuation (u.a. Rentenbeginn, Betriebshofwechsel, Kündigung) ist es erforderlich, dass ca. 30 bis 40 neue Busfahrerinnen und Busfahrer jährlich ausgebildet werden. Von den rund 350 Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter des Betriebshofes Hummelsbüttel im Fahrdienst sind nur Teilzeitmitarbeiter, Mitarbeiter in der Probezeit und reine Nachtdienstfahrer nicht auf den VOLVO-Plug-In-Bussen ausgebildet.

3.2 Arbeitspaket 2 - Erprobung Batteriebus

AP 2.1 Technische Vorbereitung BEV (FFG)

Ein weiterer zu erprobender Fahrzeugtyp waren Batteriebusse (Battery Electric Vehicle, BEV). Diese führen die für den Antrieb benötigte Energie ausschließlich in Form von elektrischer Energie mit. Mit diesen Fahrzeugen konnte insbesondere auch die Erprobung der an den Enden der Linie 109 errichteten Ladeinfrastruktur (jeweils zwei Lademasten mit Pantograph) weiter vorangetrieben werden. Entsprechend wurden durch die FFG und durch die HOCHBAHN Batteriebusse ausgeschrieben.

Verschiedene Fahrzeughersteller haben sich an der Ausschreibung beteiligt. Es wurde das Angebot des Herstellers SOLARIS, der Solobus Urbino 12 electric, ausgewählt. Dieses Fahrzeug zeichnete sich u.a. durch ein vollelektrisches Heizkonzept und die Ausstattung mit Hochleistungs-Lithium-Ionen-Batterien auf Basis von Lithium-Titanat aus (100 kWh Gesamtkapazität, davon max. 90 kWh nutzbar). Damit konnte eine Ladung mit der maximal möglichen Ladeleistung der Pantographen an den Endhaltestellen der Linie 109 realisiert werden.

Die HOCHBAHN, die FFG und der Fahrzeughersteller SOLARIS haben die betrieblichen und technischen Anforderungen an die BEV im Jahr 2015 in intensiven Gesprächen abgestimmt. Wichtig in diesem Zusammenhang war u.a., dass beide Fahrzeugtypen, PHEV und BEV an der gleichen Ladeinfrastruktur geladen werden können.

AP 2.2 Beschaffung und Inbetriebnahme BEV (FFG)

Vor der Auslieferung der Busse wurde zwischen dem Hersteller der Ladeinfrastruktur Siemens, dem Fahrzeughersteller SOLARIS, der HOCHBAHN und der FFG ein Probetrieb der Fahrzeuge auf einem Testgelände von Siemens vereinbart. Die Anlieferung des ersten Fahrzeuges zum Testgelände erfolgte Anfang Juni. Während des Probetriebes konnten mit allen drei bestellten Bussen erfolgreich Ladeversuche und Probefahrten durchgeführt werden. Im Anschluss an den Probetrieb wurden die Fahrzeuge nach Hamburg geliefert. Alle für die Zulassung erforderlichen Dokumente wurden von SOLARIS rechtzeitig vorgelegt, sodass alle drei Fahrzeuge zugelassen werden konnten. Es zeigten sich zunächst Probleme mit dem Assistenzsystem zur Positionierung des Fahrzeuges unter dem Lademast. Da die Konstruktion der Lademasten in Hamburg eine andere ist, als die der für den Probetrieb genutzten Masten, waren diese Probleme während des Probetriebes nicht absehbar. Weitere Untersuchungen durch den Fahrzeughersteller ergaben, dass je Bus der Einbau von vier zusätzliche Sensoren erforderlich war. Im Oktober waren alle Busse mit den zusätzlichen Sensoren ausgerüstet, sodass die Positionierung an den Lademasten zuverlässig funktionierte.

Im November 2016 waren alle weiteren erforderlichen Ausrüstungsarbeiten, wie z.B. der Einbau des Elektronischen Fahrscheindruckers (EFAD), an den Fahrzeugen abgeschlossen, sodass diese

in den Einsatz gehen konnten. Somit sind seit November 2016 alle drei Fahrzeuge auf der Innovationslinie 109 im Einsatz.

AP 2.3 Linieneinsatz BEV (HOCHBAHN)

Die drei Batteriebusse werden ausschließlich auf der Innovationslinie 109 eingesetzt. Im Rahmen der Inbetriebnahme- und Erprobungsphase im Herbst 2016 erfolgte ein Einsatz gezielt mit manueller Einteilung auf der Linie 109. Seit dem Fahrplanwechsel zum 11. Dezember 2016 sind zwei Umläufe für die drei vorhandenen Fahrzeuge auf der Innovationslinie 109 mit einem Einsatz von Montag bis Freitag zwischen 6.00 und 20.30 Uhr, an Sonnabenden zwischen 8 Uhr und 20 Uhr und an Sonntagen von 11.30 Uhr bis 20 Uhr vorgesehen. In dieser Zeit endet die Linie 109 fahrplanmäßig am Elektrobusterminal. Zu den übrigen Tageszeiten endet die Linie am Rathausmarkt. Ein Ladevorgang ist zu den Bedienzeiten der Linie dann nur noch am anderen Endpunkt in U Alsterdorf möglich.

Mit zunehmender Betriebspraxis stieg im Verlaufe des Jahres 2017 die Laufleistung der Busse. Es zeigte sich, dass zumindest außerhalb der Heizperiode ein Einsatz der Batteriebusse im Sommerhalbjahr auf der Linie 109 auch in den Tagesrandzeiten abweichend von der ursprünglichen Konzeption möglich ist. Parallel mit der zunehmenden technischen Zuverlässigkeit der Systeme (Bus und Pantograph) wuchs die Routine bei den Busfahrerinnen und Busfahrern im Umgang mit den Batteriekapazitäten bzw. Reichweiten der Busse und der Ladetechnik. Die Batteriekapazität für eine Hin- und Rückfahrt von U Alsterdorf bis zum Rathausmarkt plus Sicherheitsreserven ist zu diesen Zeiten ausreichend. Für eine einfache Fahrt von U Alsterdorf bis Rathausmarkt werden dann nur ca. 10% SOC (SOC oder „state of charge“ ist der aktuelle Ladezustand der Batterie) benötigt. Somit können die Busse Umläufe auf der 109 bedienen, die am Rathausmarkt enden und nicht die Ladestation am Elektrobusterminal erreichen. Vor diesem Hintergrund waren im Sommer 2017 für die drei Batteriebusse monatliche Gesamtläufe zwischen 9.500 Kilometer bis über 11.000 Kilometer möglich.

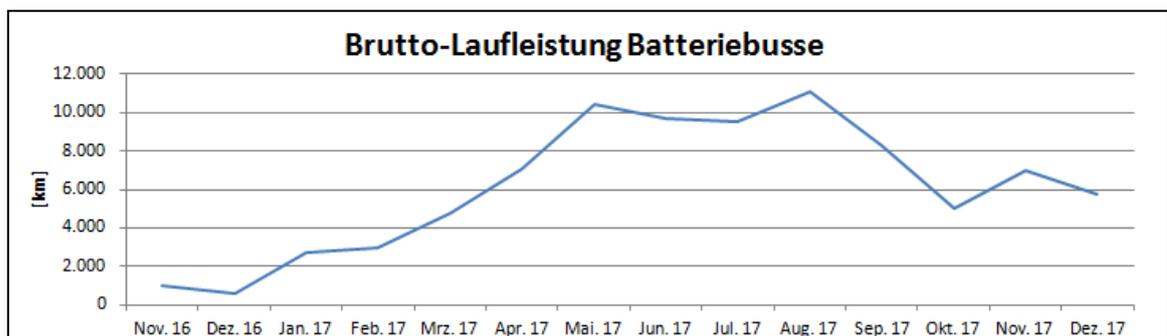


Abb. 6: Laufleistung der Batteriebusse über die Projektlaufzeit betrachtet

Im Winterbetrieb hingegen kann der Energiebedarf durch den Heizungsbetrieb für eine einfache Fahrt von U Alsterdorf bis zum Elektrobusterminal bei starken winterlichen Verhältnissen auf bis zu 25% SOC steigen. In der betrieblichen Praxis kann generell bei voller Batterieladung von einer

Reichweite von mindestens 40 Kilometern ausgegangen werden. Bei günstigeren Witterungsverhältnissen in der jahreszeitlichen Übergangszeit steigt der Wert auf über 60 Kilometer Reichweite ohne zwischenzeitliche Nachladung.

Der Rückgang der Laufleistung im 4. Quartal 2017 ist nicht kältebedingt. Er resultiert aus diversen Ausfällen an unterschiedlichen Bauteilen (bei einem Bus Ausfall eines Batteriepacks) und eines Karosserieschades.

Für die drei Batteriebusse wurde auf dem Betriebshof Hummelsbüttel ein separater Abstellstrang reserviert. Hier befinden sich die notwendigen Versorgungsanschlüsse u.a. Low-Power-Charging und Druckluft. Der Einsatz vom Betriebshof Hummelsbüttel erfolgte anfangs noch überwiegend mit manueller Einteilung. Zeitweise wird aber bereits die automatische Disposition des Betriebshof-Management-System (BMS) genutzt, die u.a. die Qualifikation des Fahrers, die Daten des Fahrzeugumlaufes und die zur Verfügung stehenden Fahrzeuge berücksichtigt. Fahrzeuge und Hintergrundsysteme sind mit entsprechender Hard- und Software versorgt. Mittelfristig ist eine vollautomatische Disposition der Batteriebusse möglich. Die Erfahrungen mit der Disposition der Batteriebusse fließen bereits jetzt in die Konzeption eines Elektrobus-BMS (E-BMS) ein. Mit dem E-BMS lässt sich zukünftig der Einsatz einer ganzen Batteriebusflotte auf einem Betriebshof in Abhängigkeit vom jeweiligen Ladezustand des einzelnen Fahrzeuges automatisch steuern. Die geplante Einsatzdauer und die zu erbringende Laufleistung werden dabei berücksichtigt.

Im ersten eigentlichen Betriebswinter 2016/2017 führten Raureif und Schneefall im Einzelfall zu Positionierungsproblemen unter den Pantographen, da das System gestört wurde. Ein Laden der Busse war in den Fällen nicht möglich. Spontane Abhilfe war durch den Einsatz von Enteisungssprays möglich, allerdings nicht als dauerhaft praktikable Lösung. SOLARIS hat daraufhin die Sensoröffnungen nachträglich mit Heizelementen ausgerüstet. In der Winterperiode 2017/2018 bewährte sich das Heizsystem. Insbesondere bei den extremen winterlichen Verhältnissen Ende Februar 2018 mit -10 °C und Schneesturm kam es zu keinen weiteren Ausfällen.

Um die Verlässlichkeit der Ladevorgängen zu optimieren, wurde zwischen den Projektbeteiligten vereinbart, dass die Betriebslenkung über längere Zeiträume die Ladevorgänge der VOLVO-PHEV und SOLARIS-BEV beobachtet und aufgezeichnet. Mittels Kameraüberwachung der Lademasten konnte der Ladevorgang und -verlauf beobachtet werden. Bei Bedarf wurden die Busfahrerinnen und Busfahrer über Funk angesprochen und befragt. Zusammen mit den Protokollen der Ladestationen und der Busse konnten so die Fehlerquellen besser zeitlich und inhaltlich zugeordnet werden. Die Zuverlässigkeit der Ladeprozesse hat sich insgesamt deutlich verbessert. Zum Projektende im Dezember 2017 ist festzustellen, dass die VOLVO-PHEV in der Regel mittlerweile problemlos unter den Lademasten geladen werden können. Dagegen gelingt es bei den SOLARIS-BEV in einigen Fällen erst bei einem zweiten Positionierungsversuch. Daher verständigten sich Siemens und HOCHBAHN, auch nach Ende des Projektes HELD, im

Februar/März 2018 in einer erneuten Kampagne von der Leitstelle jeden Ladevorgang der SOLARIS-BEV zu dokumentieren, um auch hier noch restliche Optimierungspotentiale zu heben. Im April 2018 wurde vereinbart, dass Solaris an einem Bus testweise untersucht, ggf. auf das Positionierungssystem in der heutigen Ausgestaltung zu verzichten. Entsprechend wollen alle Projektbeteiligten im Sommer 2018 entsprechende Ladeversuche mit dem adaptierten Fahrzeug und geänderte Software in Hamburg durchführen.

AP 2.4 Technische Evaluation und Optimierung BEV (FFG)

Im Rahmen der Erfassung der Betriebsdaten der Fahrzeuge auf der Linie wurden verschiedene Parameter erfasst. Hierzu zählt unter anderem auch die Verfügbarkeit. Zur Erfassung der technischen Verfügbarkeit wurde täglich pro Hauptverkehrszeit geprüft, ob das jeweilige Fahrzeug für den Einsatz zur Verfügung stand. Dies war unabhängig davon, ob das Fahrzeug an dem entsprechenden Tag tatsächlich auf der Linie 109 zum Einsatz gekommen ist. Pro Tag wurde die Verfügbarkeit somit für jedes Fahrzeug zweimal erfasst.

Die Aufzeichnung der Verfügbarkeit wurde im November 2016 begonnen und diese lag bis zum Jahresende 2016 durchschnittlich bei 51%. Im Jahr 2017 konnte die durchschnittliche Verfügbarkeit auf 64% gesteigert werden. Seit der Inbetriebnahme der Fahrzeuge ergab sich eine kumulierte Verfügbarkeit von 61%. Aufgrund von z.T. langen Standzeiten hat die Verfügbarkeit über die Zeit stark geschwankt, es muss berücksichtigt werden, dass es einzelne Monate mit einer hohen Verfügbarkeit von bis zu 95% gab.

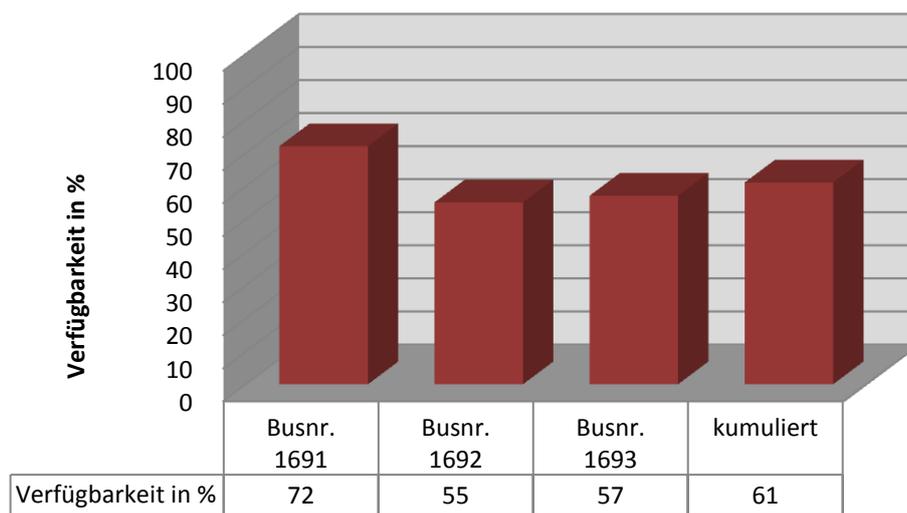


Abb. 7: Verfügbarkeit der BEV über die gesamte Projektlaufzeit

Auftretende technische Probleme wurden dokumentiert, ausgewertet und im Rahmen einer regelmäßigen Kommunikation zwischen SOLARIS und der FFG ausgetauscht und diskutiert. Als Ursachen für die Nichtverfügbarkeit der Busse haben sich fahrzeugseitig in den Jahren 2016 und 2017 bestimmte Fehlerschwerpunkte gezeigt. Die festgestellten technischen Probleme betrafen sowohl Komponenten der Hochvolt-Anlage (HV-Anlage) als auch klassische Fahrzeug-

Komponenten. Einige der festgestellten technischen Probleme traten nach deren vorläufiger Behebung in der Folgezeit erneut auf. Zudem war die herstellerseitige Fehlersuche bzw. Diagnose z.T. sehr zeitintensiv. Nachfolgend sind beispielhaft einige der in den Jahren 2016 und 2017 festgestellten Fehlerschwerpunkte aufgeführt:

- Ausfall der Displays am Fahrerarbeitsplatz
- Defekte Sensoren in den HV-Batterien
- Defekte der Heizungsanlage
- Ausfall des Positionierungssystems zur Pantographenladung
- Defekte der Beleuchtungseinrichtungen
- Ausfälle verschiedener Systemkomponenten aufgrund von mangelhaft ausgeführter Verkabelungen
- Teilweise lange Lieferzeiten von Ersatzteilen.

AP 2.5 Aus- und Weiterbildung BEV (FFG und HOCHBAHN)

Hinsichtlich der Instandhaltung der Fahrzeuge wurden nach Anlieferung der Fahrzeuge im Sommer 2016 acht Mitarbeiter durch den Fahrzeughersteller SOLARIS bei der FFG zu folgenden Themen geschult:

- HV-Anlage,
- HV-Batterien,
- Klimaanlage,
- Türen,
- Bremse,
- Aufbau – Elektronikarchitektur.

Zusätzlich haben weitere Bereitschaftsmitarbeiter der FFG eine fahrzeugspezifische Einweisung für die Batteriebusse erhalten.

Noch während der Abnahmephase der drei Batteriebusse fanden mehrtägigen Erprobungsfahrten auf einem Testgelände von SIEMENS nördlich von Berlin bei Groß Dölln im Juni 2016 statt. Hierbei konnten auch an einem mobilen Lademast erste Ladeversuche mit Pantographen in der Praxis getestet werden. Bei diesen Testfahrten wurden bereits die zentralen Ansprechpartner/Koordinatoren der Betriebslenkung und des Betriebshofes eingebunden. So konnte schon frühzeitig der jeweilige Schulungsbedarf und –aufwand ermittelt werden. Diese Koordinatoren haben nach weiteren Schulungen durch SOLARIS die Einweisung der Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter in ihren jeweiligen Bereichen übernommen bzw. begleitet.

Für die SOLARIS-Batteriebusse wurden im Spätsommer und Herbst 2016 zunächst insgesamt rund 70 Mitarbeiter im Fahrdienst in die Bedienung eingewiesen. Mit dieser Anzahl von Mitarbeitern war in der ersten Stufe des planmäßigen Fahrzeugeinsatzes ab Fahrplanwechsel am 11. Dezember 2016 der Einsatz gewährleistet. In Abhängigkeit der Verfügbarkeit der neuen SOLARIS-Busse wurden weitere Fahrdienstmitarbeiter im Jahre 2017 geschult. Zum Ende des

Projektzeitraumes im Dezember 2017 waren insgesamt 240 Busfahrerinnen und Busfahrer des Betriebshofes Hummelsbüttel auf den drei SOLARIS-Bussen eingewiesen. Mit dieser Mitarbeiterzahl ist ein flexibler Einsatz möglich. Bisher nicht geschult wurden Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter, die in der Probezeit sind bzw. in Teilzeit arbeiten.

Neben der Einweisung der Fahrdienstmitarbeiter in die Neufahrzeuge erfolgte parallel eine Unterweisung der Betriebsaufseher und der Mitarbeiter der Betriebslenkung in der Technik der Fahrzeuge und den Besonderheiten des Lademanagements. Insbesondere auf fehlerhafte Ladeereignisse und einem damit verbundenen niedrigen Ladestatus wurden die dann zu treffenden dispositiven Schritte festgelegt, um den Betrieb aufrecht zu erhalten bzw. den Bus noch zum Betriebshof zu leiten.

3.3 Arbeitspaket 3 – Infrastruktur (HOCHBAHN)

AP 3.1 Definition und technische Vorbereitung Infrastruktur

Die Plug-in-Busse und die Batteriebusse werden sowohl über Nacht auf dem Betriebshof als auch im Liniendienst tagsüber nachgeladen, um ihre Verkehrsleistung sicher und in dem geplanten Umfang zu erbringen. Hierfür stehen sowohl die Ladeinfrastruktur an den Endhaltestellen der Innovationslinie 109 als auch die Ladeeinrichtungen auf den Betriebshöfen zur Verfügung.

In diesem Arbeitspaket wurden alle dafür erforderlichen Parameter und Spezifikationen, wie zum Beispiel Ladeleistung, Ladespannung, Art der Kommunikation, Art der Kontaktierung und Art der Positionierung mit den Projektpartnern VOLVO und SOLARIS als Hersteller der Fahrzeuge und Siemens als Lieferant der Ladeinfrastruktur abgestimmt und entwickelt.

AP 3.2 Beschaffung und Inbetriebnahme Infrastruktur

Für das Laden der Busse wird zwischen den Ladegeräten auf dem Busbetriebshof (Low-Power-Charging) und dem Laden auf der Strecke (High-Power-Charging) unterschieden. Alle sechs Fahrzeuge (3 Plug-in-Busse, 3 Batteriebusse) sind auf dem Busbetriebshof Hummelsbüttel, Lademannbogen 2, 22339 Hamburg, untergebracht. Hier stehen jetzt insgesamt acht Ladegeräte zur Verfügung. An den Endhaltestellen der Innovationslinie, Elektrobusterminal und U -Alsterdorf, wurden jeweils zwei Lademasten zum Schnellladen errichtet. Die Anlagen wurden im Dezember 2014 in Betrieb genommen. Im September 2015 fand die endgültige technische Abnahme statt.

Abb. 8: Lademast an der Endhaltestelle Elektrobusterminal



Messungen am 10. August 2016 haben ergeben, dass die Batteriebusse die Ladeleistung von 300 kW bei jedem Ladevorgang voll ausnutzen und dass der Wirkungsgrad über das gesamte System, von der Mittel-, über die Niederspannung, bis hin zur Ladegleichspannung bei 93% bis über 97% liegt. Somit ist diese Energieübertragung als ein sehr wirtschaftliches Ladesystem zu bewerten.

Seit Inbetriebnahme der Anlagen haben diverse technische Weiterentwicklungen zu einem sehr stabilen Betrieb und einer Anlagenverfügbarkeit von nahezu 100% geführt. Zuweisungen von Energiemengen und auftretenden Fehlern können fahrzeugbezogen vorgenommen und analysiert werden.

AP 3.3 Laden auf Haltestellen

Die Ladedauern sind bei den Plug-in-Bussen im Vergleich zu den Batteriebussen unterschiedlich. Während die Plug-In-Busse derzeit ca. 7 min bei einer Ladeleistung von ca. 90 kW (fahrzeugseitige Anforderung) benötigen, liegt die Zeitdauer bei den Batteriebussen für eine vollständige Ladung aufgrund der vollen Ausnutzung der 300 kW Ladeleistung deutlich unter 7 Minuten.

Die Erprobung im Liniendienst hat gezeigt, dass die richtige Positionierung der Plug-in-Busse am Lademast anfänglich schwierig war und zu Fehlermeldungen geführt hat. Auch bei den Batteriebussen war die Positionierung anfangs schwierig. Die Positionierung der Batteriebusse wird durch ein elektronisches Positionierungssystem unterstützt. Dieses wurde weiterentwickelt und praxistauglich optimiert. Weiterhin wurden geringfügige Anpassungen an den Lademasten vorgenommen um das Positionierungssystem zu installieren.

Die Anzahl der erfolgreich durchgeführten Ladevorgänge konnte durch verschiedene Optimierungsprozesse im Laufe der Zeit gesteigert werden. Die Quote der erfolgreichen Ladevorgänge liegt aktuell bei ca. 95 % (vorher 65%).

Ebenso nahm der Anteil der elektrisch geleisteten Fahranteile der Volvo Plug-In Busse auf der Innovationslinie 109 zu und erreicht aktuell, durch Einführen von GPS-gesteuerten Zonen, in denen der Plug-In-Bus nur rein elektrisch angetrieben werden darf, bis zu ca. 65 - 70%. Somit wurde das für die Erprobung gesetzte Ziel von 70% rein elektrischer Fahrleistungsanteile der Strecke erreicht. Eine Steigerung der elektrischen Fahranteile auf der Linie 109 ist mit diesem Fahrzeugkonzept (GPS-gesteuerte emissionsfreie Zonen) nicht weiter möglich.

AP 3.4 Laden auf dem Busbetriebshof

Das langsame Laden der Busse über Nacht erfolgt über Ladegeräte, die mit einem Typ2 Stecker an den Bus angeschlossen werden. Als Anschluss für das Ladegerät dient ein herkömmlicher 32A (VOLVO) und ein 63A (SOLARIS) 400V Drehstromanschluss (dreiphasig, 50Hz). Über diese Ladegeräte werden auch die Zellen der Batterien balanciert (Zellspannungen werden

angepflichtet/harmonisiert) und somit die Lebensdauer dieser Zelltechnologie optimiert. Anfängliche Probleme beim elektrischen Vorheizen der Batteriebusse konnten beseitigt werden.

AP 3.5 Technische Evaluation und Optimierung der Ladeinfrastruktur

Als Erkenntnisse aus diesem Arbeitspaket sind u.a. Anpassungen an Fahrzeugen und Infrastruktur (Software- sowie hardwareseitig), Fahrerschulungen, eine „driver charging card“ erarbeitet und eine detaillierte Ereignisdokumentation entwickelt worden. VOLVO und Siemens haben eine Task Force Gruppe gegründet, um ereignisorientiert Fehler erkennen und analysieren zu können. Dies hat zu einer wesentlichen Verbesserung der positiven Ladeereignisse und einem Anstieg der elektrisch gefahrenen Streckenkilometer (Plug-In Busse VOLVO) geführt. Gemeinsam mit VOLVO/SOLARIS und Siemens wurde an der Stabilisierung und kontinuierlichen Verbesserung dieser Zustände gearbeitet. Das Projekt hat gezeigt, dass mit so einem System ein zuverlässiger und stabiler Busbetrieb möglich ist. Es wurde die Praxistauglichkeit des Systems nachgewiesen!

3.4 Arbeitspaket 4 - Evaluation

Die in den nachfolgenden Kapiteln dargestellten Inhalte fassen die wichtigsten Ergebnisse der Forschungsbegleitung zum Verbundprojekt Hamburger Elektrobuss Demonstration (HELD), durchgeführt durch das Institut für Kraftfahrzeuge der RWTH Aachen University, zusammen. Eine tiefere Darstellung der Ergebnisse kann dem separaten Abschlussbericht zur Förderung mit dem Förderkennzeichen 16EM2058-2 entnommen werden.

AP 4.1 Datenerfassung (ika)

Die im Projektverlauf durchgeführte Datenerfassung bildet die Grundlage für die weiteren Arbeitspakete der Forschungsbegleitung. Die erhobenen Daten lassen sich in drei Hauptkategorien einteilen:

- Erhebung von zeitaufgelösten Signalen während des Betriebs zur Erstellung von Simulationsmodellen,
- Erhebung von Langzeitdaten auf täglicher/monatlicher Basis zur Bewertung des Energiebedarfs und der Emissionen,
- Durchführung von Akustikmessungen zur Ermittlung der Geräuschemissionen.

Die erste Kategorie der Messdaten wird benötigt, um Simulationsmodelle der verschiedenen Fahrzeugtypen zu erstellen. Diese dienen der Durchführung der unter Abschnitt 4.4 dargestellten Extrapolation der Technologien auf andere Linienverläufe und Fahrzeugkonfigurationen über den vorliegenden Anwendungsfall des Feldversuches hinaus. Die benötigten und verfügbaren Informationen wurden zu Projektbeginn mit den Projektbeteiligten abgestimmt. Um die Menge der erhobenen Daten zu limitieren und damit die Handhabbarkeit zu gewährleisten, wurden dedizierte Messzeiträume festgelegt. Diese beschränken die Datenerhebung auf mehrere, rund dreiwöchige Abschnitte. Diese Messzeiträume wurden derart

terminiert, dass diese den typischen Linieneinsatz (ohne Einfluss von Ferienzeiten oder Baustellen) bei verschiedenen klimatischen Bedingungen (Sommer/Winter) darstellen. Als Ergebnis liegen zeitaufgelöste Messdaten vor, sowohl für die Fahrten entlang des Linienvverlaufs als auch zwischen der End- und Starthaltestelle. Diese Daten sind aus den folgenden Datenquellen aggregiert:

- Signale aus dem Fahrzeug CAN Bus,
- Daten des Fahrgast-Informations- und Management-Systems (FIMS) der HOCHBAHN,
- Informationen zur Außentemperatur zum Zeitpunkt der Fahrt,
- Typischer Besetzungsgrad mit Passagieren zum Zeitpunkt der Fahrt.

Hiermit ist die Untersuchung des Energiebedarfs in Abhängigkeit des Fahrprofils, sowie die Erstellung von Modellen zur Darstellung des Verhaltens in simulierter Umgebung möglich.

Die zweite Kategorie an Daten wird ereignisbasiert, täglich oder monatlich erhoben. Hierdurch reduziert sich die Informationsmenge erheblich und es kann eine durchgehende Erhebung über weite Zeiträume hinweg stattfinden. Gegenüber den zuvor dargestellten Datenquellen kommen dabei folgende Datenquellen hinzu:

- Daten aus dem Fleet Management System der Hersteller der Fahrzeuge und Ladeinfrastruktur,
- Nachtankdaten aus der Tankdatenerfassung der HOCHBAHN (nur bei PHEV relevant),
- Daten zum Energiebedarf für die Nachtladung der HOCHBAHN.

Die Aggregation der verschiedenen Quellen innerhalb der zweiten Kategorie an Messdaten wird durchgeführt, um einerseits die notwendige Grundlage für die nachfolgenden Betrachtungen zum Energiebedarf und zur Leistungsfähigkeit zu schaffen und andererseits einen Abgleich redundanter Informationen zu ermöglichen, welcher eine Abschätzung der Validität der Datenquellen ermöglicht.

Die dritte Kategorie an Messdaten basiert auf der Durchführung von Akustikmessungen zur Erhebung des Geräuschverhaltens der Busse. Am Institut für Kraftfahrzeuge der RWTH Aachen University besteht hierzu eine in zahlreichen Projekten entwickelte Methodik, welche zum Vergleich der Lärmemissionen verschiedener Antriebstechnologien in Stadtbussen geeignet ist. Die Busse werden hierbei mit Sensoren zur Erfassung des Luft- und Körperschalls sowie zur Bewegung des Fahrzeugs messtechnisch ausgerüstet. Anschließend erfolgt die Messung des Geräuschverhaltens anhand definierter und möglichst realitätsnaher Fahrmanöver wie einer simulierten An- bzw. Abfahrt an eine Haltestelle sowie Fahrten mit konstanter Geschwindigkeit. Die entstehenden Außengeräusche werden ebenfalls, an gängigen Messpositionen gemäß Richtlinien, erfasst.

Für die im Rahmen des Projektes durchgeführten Akustikmessungen wurde zunächst ein geeigneter Messort identifiziert, der im Einzugsbereich der Ladeinfrastruktur lag, um die Busse versorgen zu können. Als geeignete Lokalität wurde der Kaltehofer Hauptdeich von der HOCHBAHN vorgeschlagen und der erforderliche Zugang organisiert. In zwei Messkampagnen wurden zunächst ein konventionell angetriebener Referenzbus und ein Plug-In-Bus und zum

zweiten Termin ein Batteriebus vermessen. Für den Plug-In-Bus wurden die Messungen sowohl im rein- elektrischen als auch im hybriden Betrieb durchgeführt.

Neben der zuvor dargestellten Erfassung von technischen Daten zu den Fahrzeugen und Antriebssystemen im Rahmen des Forschungsprojektes wurde überdies die Subjektiv-Bewertung der Technologie erhoben. Hierzu wurde eine Befragung mittels Fragebogen unter den Busfahrern als Anwender der Technologie durchgeführt. Hiermit sollten insbesondere Verbesserungspotentiale in der Gestaltung der Technologie, sowie die empfundene Reife der Technologie identifiziert werden. Der erstellte Fragebogen gliedert sich daher in Fragen zur Person, zu beiden untersuchten Fahrzeugtypen sowie zur Ladeinfrastruktur auf. Es zeigt sich eine positive Haltung und Beurteilung der Technologie von Stadtbussen mit Zwischenladung, wobei weitere Verbesserungen mit höherem Reifegrad zu erwarten sind.

AP 4.2 Energiebedarf und Emissionen (ika)

AP 4.2.1 Energiebedarf

Der Energiebedarf der Busse setzt sich aus verschiedenen Energieträgern zusammen:

- Bedarf an Dieselkraftstoff (Referenzfahrzeug und Plug-In-Hybrid) zur Umsetzung im Verbrennungsmotor in mechanische Energie zum Antrieb des Fahrzeugs inkl. Nebenaggregate sowie in Abwärme, welche zum Heizen des Innenraums verwendet werden kann. Der Dieselkraftstoff wird täglich nachgetankt.
- Bedarf an Heizöl zum Heizen des Innenraums des Fahrzeugs (Referenzfahrzeug und Plug-In-Hybrid). Das Heizöl wird in der Regel täglich nachgetankt.
- Elektrischer Energiebedarf zum Antrieb des Fahrzeugs inkl. Nebenaggregate (Plug-In-Hybrid und batterieelektrisches Fahrzeug). Die elektrische Energie wird sowohl über Nacht im Busdepot als auch über Tag an der Schnellladeinfrastruktur bereitgestellt.

Zur Betrachtung des Energiebedarfs der Fahrzeuge wird für elektrifizierte Fahrzeuge im Allgemeinen der streckenbezogene Energiebedarf in der Einheit [kWh/km] herangezogen. Die Bilanzgrenze für die Ermittlung des Energiebedarfs schließt hierbei die Bereitstellung des Energieträgers aus (reine Tank-to-Wheel Betrachtung). Im Projekt werden die Plug-In-Hybrid Busse mit batterieelektrischen und konventionell angetriebenen Referenzfahrzeugen verglichen. Zur Durchführung des Vergleichs ist es folglich notwendig, die verschiedenen Energieformen auf eine einheitliche Einheit zu bringen. Aus diesem Grund werden die Heizöl- und Dieselmengen mit einer Dichte von 0,84 kg/l und einem Energiegehalt von 42,5 MJ/kg auf den Energiebedarf je Strecke angerechnet. Aus den erhobenen Werten zum Energiebedarf der Fahrzeuge geht hervor, dass eine Gesamtbilanzierung anhand eines einzelnen Gesamtmittelwertes über alle Fahrten des Feldversuchs nicht sinnvoll erscheint. Sowohl die Summe des Energiebedarfes der einzelnen Energieträger, als auch deren Aufteilung auf die verschiedenen Energiequellen unterliegen einer hohen Schwankungsbreite, welcher auf die Heterogenität der Betriebsbedingungen

zurückzuführen ist. Aus den erhobenen Messdaten ergibt sich zum einen eine Schwankungsbreite innerhalb einer Gruppe von Fahrten vergleichbarer Außentemperaturen. Dieser Zusammenhang ist in der nachfolgenden Abbildung dargestellt:

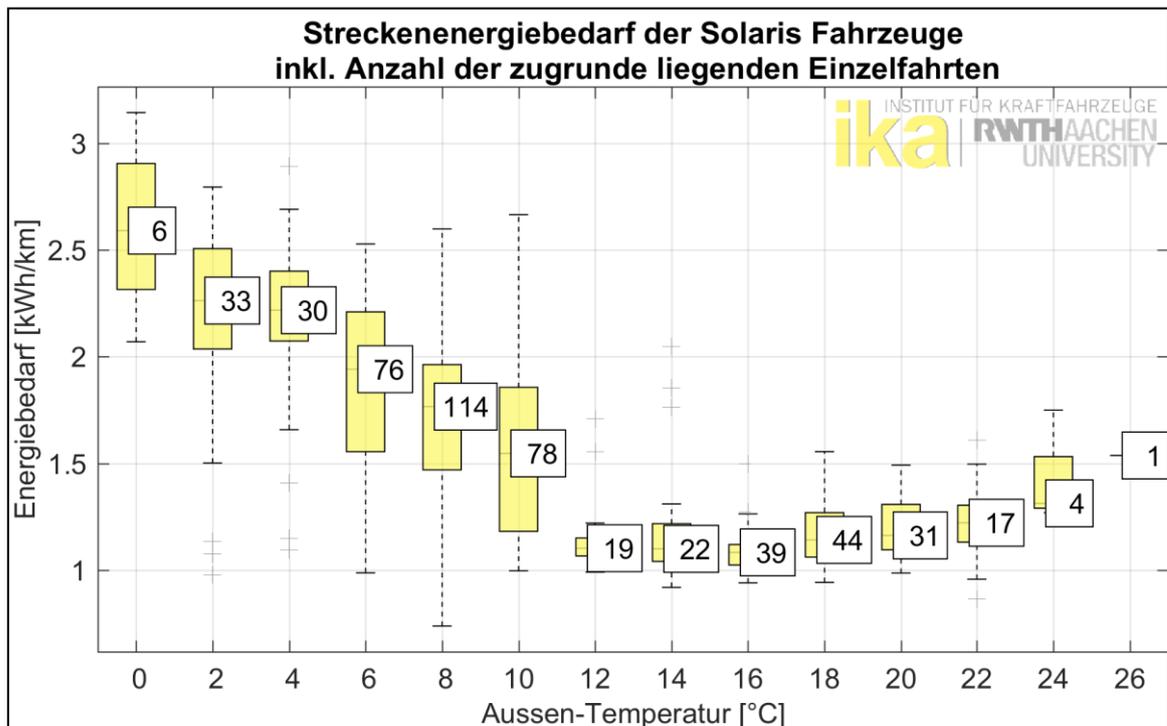


Abb. 9: Streckenbezogener Energiebedarf der Einzelfahrten der Volvo Fahrzeuge über der Außentemperatur

Aus diesem Grund werden für diese Temperaturintervalle Medianwerte des Energiebedarfs (teilen die Population der Fahrten in gleich große Gruppen höheren und niedrigeren Wertes) bestimmt. Dieser Schwankung überlagert ist die Abhängigkeit von der Außentemperatur, welche für jede Fahrt gemittelt abgeschätzt wird und zur Gruppierung der Fahrten dient.

Dargestellt ist der aus den verschiedenen eingesetzten Energieträgern resultierende streckenbezogene Energiebedarf in kWh/km für die Solaris Fahrzeuge über der Außentemperatur. Die Außentemperatur wird für jede Fahrt gemittelt abgeschätzt und dient zur Gruppierung der Fahrten. Als Darstellung ist das Format des Boxplots gewählt, welcher dazu geeignet ist Verteilungen darzustellen. Die Zahlen an den einzelnen Balken kennzeichnen jeweils die Anzahl der zugrunde liegenden Messfahrten für jeden Balken. Die Länge eines Balkens repräsentiert die Bandbreite an Werten für den Energiebedarf, welche die Hälfte aller Fahrten abdeckt (50 % Intervall). Einzelne Ausreißer, insbesondere nach oben, sind durch die Kreuze dargestellt. Wären alle Fahrten in einer einzelnen Verteilung bzw. einem Balken dargestellt, ergäbe sich ein sehr breites Spektrum. Dieses würde variieren sofern im Rahmen des Projektes mehr Messfahrten im Winter/Sommer oder im Frühjahr/Herbst durchgeführt worden wären. Aus diesem Grund erfolgt die Gruppierung der Einzelfahrten nach Temperaturintervallen. Auf

Höhe der Position der Boxen mit der Anzahl liegt der sogenannte Medianwert. Dieser teilt die Gesamtsumme der Fahrten in gleich große Gruppen höheren und niedrigeren Wertes.

Im Weiteren wird der Verlauf des 50 %-Intervalls über der Außentemperatur betrachtet. In der folgenden Abbildung ist der Energiebedarf für die drei Fahrzeugkonzepte dargestellt:

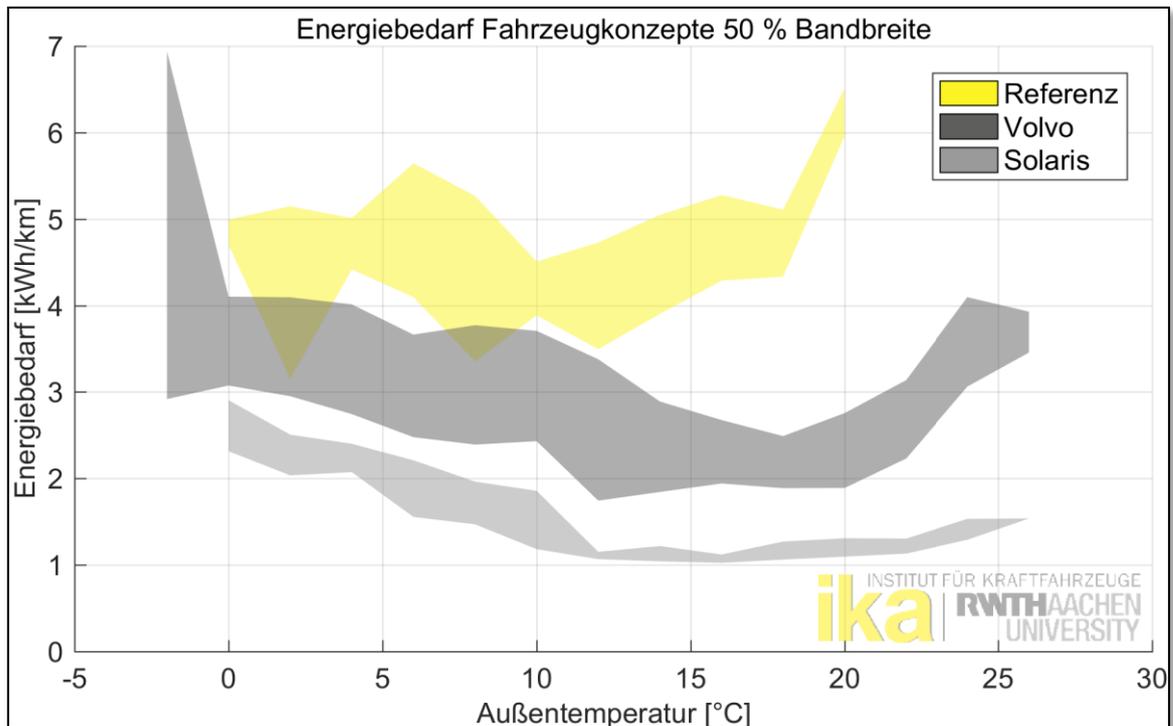


Abb. 10: Streckenbezogener Energiebedarf der verschiedenen Fahrzeugtypen

Dargestellt sind die 50 % Intervalle des streckenbezogenen Energiebedarfs der verschiedenen Fahrzeugkonzepte. Für das Referenzfahrzeug sind hier die täglichen Nachtankmengen an Diesel und Heizöl in Betracht bezogen. Für die Volvo Fahrzeuge sind der elektrische Energiebedarf ab der Fahrzeugbatterie und der Kraftstoffbedarf während der Einzelfahrten sowie der umgelegte tägliche Heizölbedarf berücksichtigt. Für die Solaris Fahrzeuge ist der elektrische Energiebedarf ab der Fahrzeugbatterie während der Einzelfahrten berücksichtigt. Eine Umlage des Energiebedarfs aus dem Depotladen ist nicht enthalten, da dieser nicht tages- bzw. fahrtgenau erfasst wird. Dieser beträgt umgelegt für die Solaris Flotte etwa 0,5 kWh/km und 0,1 kWh/km für die Volvo Fahrzeuge. Dies bedeutet, dass der erste Ladevorgang der Batterie, welcher während der nächtlichen Abstellung auf dem Betriebshof erfolgt, nicht in die Gesamtbilanz eingeht.

In der nachfolgenden Abbildung ist die Aufteilung des Energiebedarfs auf die verschiedenen Energieträger dargestellt:

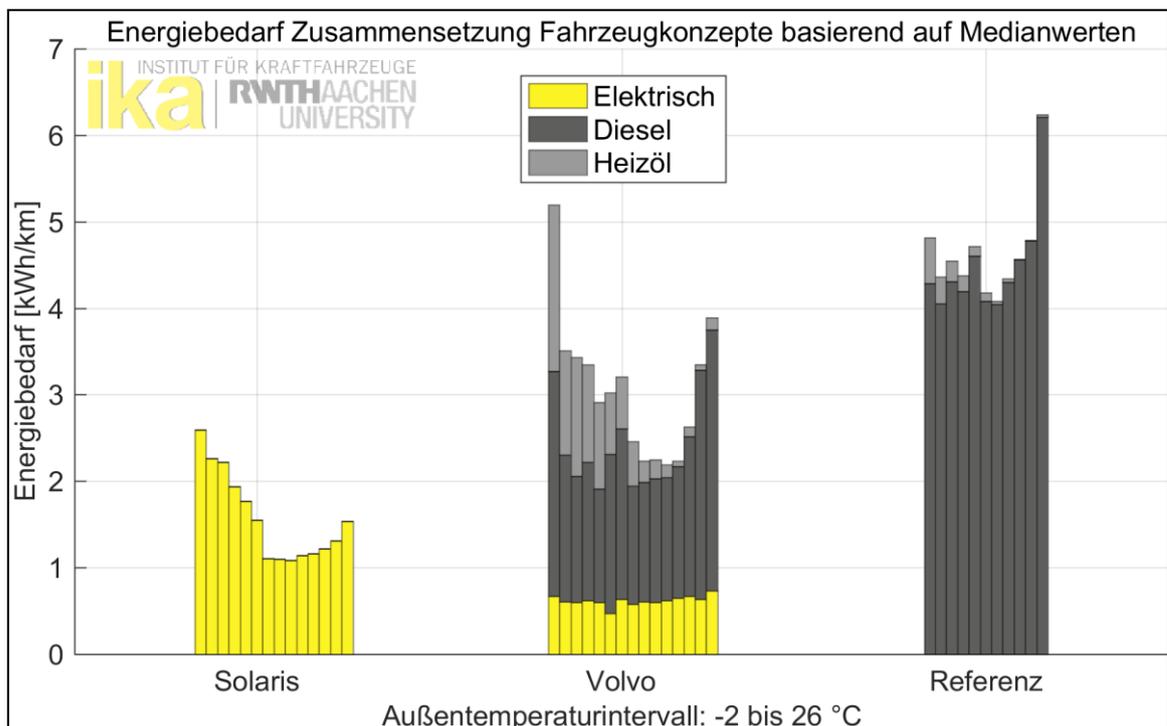


Abb. 11: Streckenbezogener Energiebedarf der verschiedenen Fahrzeugtypen nach Energieträgern

Dargestellt sind die Medianwerte der einzelnen Energieträger über der Außentemperatur in Analogie zu den beiden vorherigen Abbildungen. Aus Gründen der Übersichtlichkeit erfolgt die Anordnung in horizontaler Richtung gruppiert nach den Fahrzeugtypen. Die hohen Maximalwerte an den Rändern des Temperaturintervalls können als Ausreißer betrachtet werden, da hier die Datenbasis gering ist.

Folgende Aussagen über den Energiebedarf in Abhängigkeit der Außentemperatur lassen sich aus der Datenerhebung ableiten:

- Der Energiebedarf des konventionellen Referenzfahrzeuges variiert im Bereich zwischen 4 kWh/km und 5 kWh/km (40 l/100km – 50 l/100km Heizöl/Diesel).
- Der absolute Energiebedarf der Plug-In-Hybrid Fahrzeuge variiert in Abhängigkeit der Außentemperatur. Ein Grund hierfür liegt im geringen Grundenergiebedarf für den Antrieb des Fahrzeugs. In der gewählten Antriebsdimensionierung können die Fahrzeuge einen Großteil der Fahrstrecke elektrisch zurücklegen, sofern die Batterie zu Fahrtbeginn vollständig geladen ist. Während der elektrischen Fahrt liegt ein geringer Energiebedarf vor. Dies ist zum Einen auf den hohen Wirkungsgrad des Elektromotors – verglichen mit dem Verbrennungsmotor – zurückzuführen. Zum Anderen besteht, anders als bei konventionell (dieselmotorisch) angetriebenen Fahrzeugen, die Möglichkeit der Energierückgewinnung. Während Bremsvorgängen kann der Elektromotor als Generator betrieben werden. Hierdurch kann die Bewegungsenergie des Fahrzeugs teilweise zurückgewonnen werden und beim nächsten Beschleunigungsvorgang genutzt werden, was den Netto-Bedarf an

elektrischer Energie reduziert. In der Folge ergibt sich ein geringer Gesamtenergiebedarf von unter 2,5 kWh/km für gemäßigte Außentemperaturen zwischen 12 und 22 °C. Somit kann der Energiebedarf während des Fahrbetriebes bei diesen Umgebungsbedingungen durch die Hybridisierung mit externer Lademöglichkeit um ca. 50 % reduziert werden. Der Kraftstoffbedarf reduziert sich um mehr als die Hälfte. Der Vorteil der Plug-In-Hybrid Fahrzeuge hinsichtlich des Energiebedarfs reduziert sich mit abnehmenden Außentemperaturen. Der Heizölbedarf übersteigt den der Referenzfahrzeuge und nimmt stärker zu (siehe hellgraue Balken in oben stehender Abbildung). Hieraus lässt sich schließen, dass durch die verringerten Laufzeiten des Verbrennungsmotors im Hybridbetrieb die Menge an nutzbarer Abwärme abnimmt. Dies führt zu einer gegenüber den Referenzfahrzeugen stärkeren Zunahme des Heizölbedarfs und damit einer Verringerung des Vorteils hinsichtlich des Energiebedarfs. Hinsichtlich hoher Außentemperaturen ist wie für die konventionellen Fahrzeuge ein Anstieg des Energiebedarfs aufgrund der erhöhten Klimatisierungsanforderung zu verzeichnen.

- Die batterieelektrischen Busse weisen unter den hier verglichenen Konzepten im Fahrbetrieb den geringsten Energiebedarf auf. Bei gemäßigten Temperaturen ohne Einsatz von Heizung oder Klimatisierung liegt dieser ohne Berücksichtigung der über Nacht auf dem Betriebshof aufgenommenen Energie bei ca. 1,1 kWh/km und damit rund 75 % unterhalb des Bedarfs der konventionell angetriebenen Fahrzeuge und rund 50 % unterhalb der Werte der hier getesteten Plug-In-Hybrid Fahrzeuge. Wie für die Plug-In-Hybrid Fahrzeuge ist ein Anstieg des Energiebedarfs hin zu niedrigen Außentemperaturen zu verzeichnen. Bei den batterieelektrischen Fahrzeugen wird der gestiegene Bedarf an Heizenergie nicht über Heizöl, sondern aus der Energie der Traktionsbatterie gedeckt. Da die Wirkungsgrade elektrischer Heizer wie auch der Öl-Heizer vergleichbar sind, ist der absolute Anstieg des Energiebedarfs zur Heizung des Innenraums über die verschiedenen Antriebskonzepte hinweg vergleichbar. Dies bedeutet andererseits, dass der Energiebedarf der batterieelektrischen Fahrzeuge den größten relativen Schwankungen aufgrund der Außentemperaturen unterworfen ist. Bei niedrigen Außentemperaturen kann sich dieser mehr als verdoppeln, sodass die Energieaufwände für die Klimatisierung und für den Antrieb ähnlich groß sind. Folglich verringert sich auch der relative Vorteil gegenüber dem konventionellen Fahrzeug auf rund 50 % des Vergleichswertes für niedrige Temperaturen. Für hohe Außentemperaturen ist wie für die anderen Antriebskonzepte ein Anstieg des Energiebedarfs zu verzeichnen. Dieser erfolgt jedoch mit einem geringeren Gradienten. Auch hier wird die erforderliche Energie zum Betrieb der Klimatisierung ausschließlich aus der Traktionsbatterie gewonnen. Eine notwendige zwischengeschaltete Energiewandlung von chemischer Energie mittels Verbrennungsmotor entfällt, sodass höhere Wirkungsgrade erzielt werden.

Betrachtet man statt des Energiebedarfs die erzielten elektrischen Fahrstrecken, so zeigt sich für die Einzelfahrten zwischen den Endhaltestellen das Ergebnis in der folgenden Abbildung:

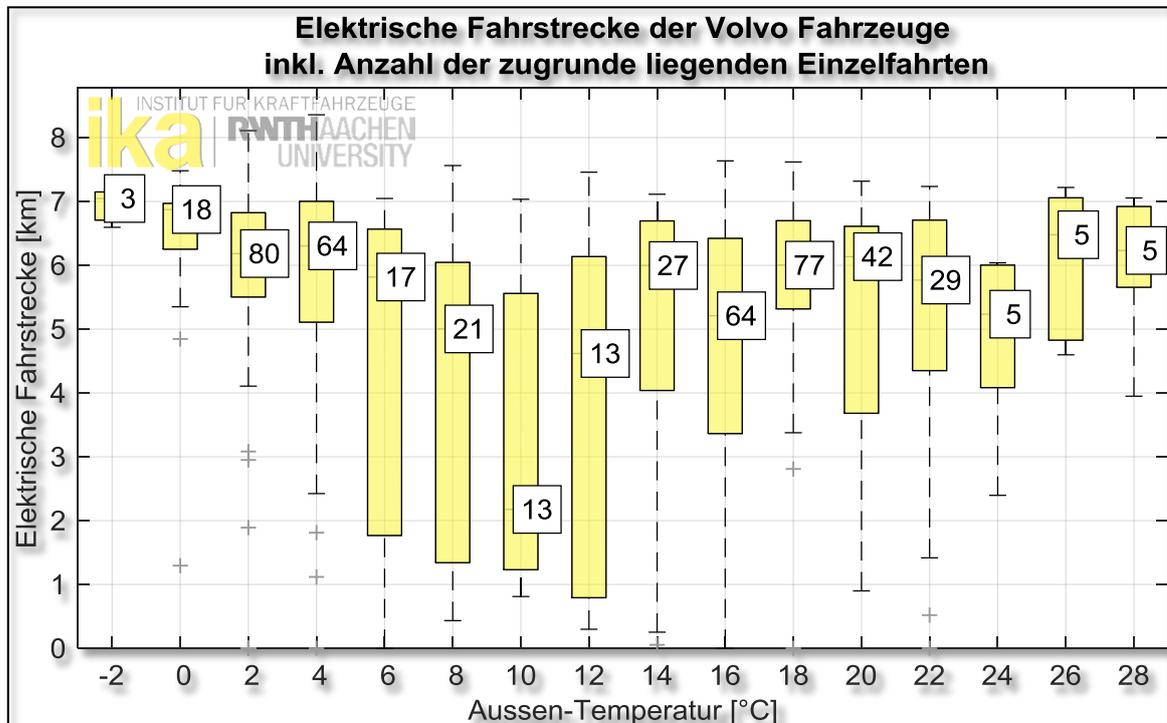


Abb. 12: Elektrische Fahrstrecke der Volvo Fahrzeuge während den Einzelfahrten

Unter elektrischer Fahrstrecke wird dabei die gesamte Wegstrecke berechnet, welche während einer Fahrt auf der Linie 109 mit ausgeschaltetem Verbrennungsmotor zurück gelegt wird. Diese kann durch den Start des Verbrennungsmotors unterbrochen und anschließend fortgesetzt werden. Im Gegensatz dazu lässt sich ferner die elektrische Reichweite definieren als die zurückgelegte Strecke bis zum ersten Start des Verbrennungsmotors. Letztere ist im vorliegenden Fall nicht aussagekräftig, da der Betrieb des Verbrennungsmotors von vielen Aspekten abhängt. Neben dem Batterieladegrad gehen hier das Abgasnachbehandlungssystem und die Definition sogenannter Zero-Emission-Zones ein, welche den Start des Verbrennungsmotors in bestimmten Bereichen der Stadt unterdrücken. Für die elektrische Reichweite zeigt sich in oben stehender Abbildung keine Abhängigkeit von der Außentemperatur, was wie zuvor beschrieben auf die vom elektrischen System entkoppelte Heizung zurückzuführen ist.

Anders stellt sich die elektrische Reichweite der batterieelektrischen Fahrzeuge dar, welche zum Betrieb der Busse auf der vorgesehenen Linie die Linienlänge deutlich übersteigt. Hier ist die Betrachtung über die Länge einer Einzelfahrt hinaus erforderlich.

In der folgenden Abbildung ist die Differenz des Batterieladegrades zwischen dem Beginn und dem Ende der Einzelfahrten dargestellt:

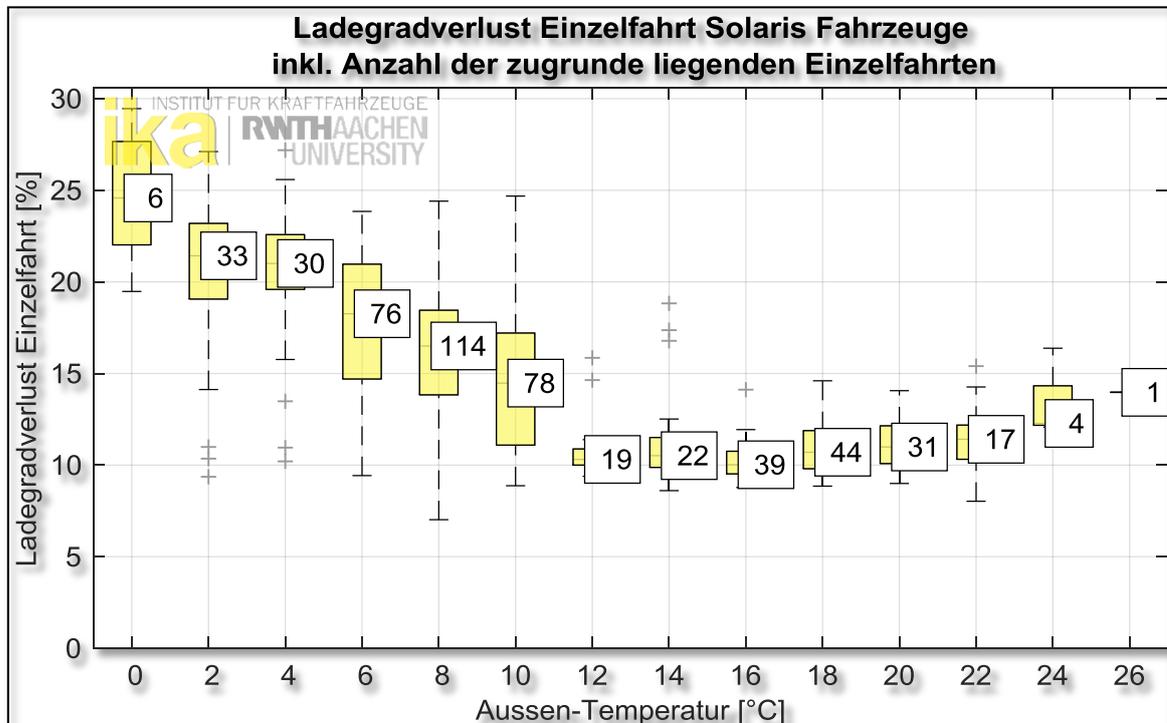


Abb. 13: Ladegradverlust der Solaris Fahrzeuge während den Einzelfahrten

Das Ergebnis der Abbildung ist äquivalent zum zuvor dargestellten Energiebedarf der Fahrzeuge. Folglich variiert der Ladegradverlust der Batterie zwischen den Endhaltestellen (ca. 9,5 – 9,6 km Fahrtstrecke) zwischen ca. 10 % und 25 % in Abhängigkeit der Außentemperatur. Somit ergibt sich theoretische Reichweite des vier bis zehnfachen der Einzelfahrtlänge.

AP 4.2.2. CO₂-Emissionen (Tank-to-Wheel-Betrachtung)

Neben dem Energiebedarf sind die CO₂-Emissionen Gegenstand der durchgeführten Untersuchung. Ebenso wie für den Energiebedarf erfolgt hier die Betrachtung gemäß einer Tank-to-Wheel Betrachtung, d.h. die für die Bereitstellung des Energieträgers notwendigen CO₂-Emissionen werden nicht betrachtet. Dies ist insbesondere für die elektrische Energie relevant, da hier keine lokalen Emissionen beim Betrieb der Fahrzeuge entstehen. Die CO₂-Emissionen werden ebenfalls auf die Fahrtstrecke bezogen und in der Einheit [g/km] angegeben. Zur Umrechnung des Diesel- bzw. Heizölverbrauchs in die CO₂-Masse wird ein Faktor von 3,15 kg CO₂/l angesetzt. Hieraus resultieren folgende Aussagen:

- Die CO₂-Emissionen der konventionell angetriebenen Referenzfahrzeuge betragen in einem weiten Temperaturbereich ungefähr 1200 g/km. Diese sind proportional zum zuvor geschilderten Energiebedarf, da dieser ausschließlich aus konventionellen Energieträgern bereitgestellt wird.

- Für die Plug-In-Hybridfahrzeuge ergibt sich für die CO₂-Emissionen ein höheres relatives Einsparpotential gegenüber konventionell angetriebenen Fahrzeugen von ca. 50 – 66 % auf einen Wert von 400 – 600 g/km. Dies resultiert aus dem vollständigen Entfall der CO₂-Emissionen bei Verwendung elektrischer Energie. Im Gegensatz hierzu reduzierte sich der Energiebedarf der Fahrzeuge lediglich aufgrund des höheren Wirkungsgrades der Energiewandlung für den elektrischen Teil des Antriebes.
- Die batterieelektrischen Busse weisen bei der gewählten Betrachtungsweise keine CO₂-Emissionen auf, sodass diese auch unter diesem Aspekt das größte Potential bieten. Legt man einen Strommix mit CO₂-Emissionen von derzeit etwa ca. 500 g/kWh (Angabe des Umweltbundesamtes: <https://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/energieversorgung/strom-waermeversorgung-in-zahlen#Strommix> https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/376/bilder/entwicklung_der_spezifischen_kohlendioxid-emissionen_des_deutschen_strommix_1990-2016.png) in der Produktion zu Grunde, so liegen bei gemäßigten Außentemperaturen die CO₂-Emissionen der Batteriebusse leicht unterhalb der anderen Konzepte. Mit abnehmender Außentemperatur geht dieser Vorteil aufgrund des überproportionalen Anstiegs des Energiebedarfs verloren, da sich der Energiebedarf der Fahrzeuge verdoppelt.

Über den genannten Energiebedarf während des Fahrbetriebs hinaus verfügen beide alternative Antriebskonzepte über die Möglichkeit, die Fahrzeuge während des nächtlichen Verbleibs im Depot mittels Ladegerät für den nächsten Betriebstag zu vorzubereiten. Neben dem Laden der Batterie erfolgt hierbei u.a. der Ausgleich etwaiger Ladeunterschiede zwischen den einzelnen Batteriezellen. Diese Funktionen sind ebenfalls mit Energieaufwand verbunden welcher im Projekt über die Ladegeräte im Depot für alle Fahrzeuge eines Typs gesammelt erhoben wird. Dies erhöht den Energiebedarf wie zuvor beschrieben für die Solaris Flotte um etwa 0,5 kWh/km und 0,1 kWh/km für die Volvo Fahrzeuge.

AP 4.2.3 Lärmemissionen

Neben der Beurteilung der Klimawirksamkeit anhand der CO₂-Emissionen spielen Lärmemissionen eine wichtige Rolle im urbanen Umfeld. Aus den durchgeführten Messungen ergibt sich für das Fahrmanöver einer rein elektrischen Haltestellenabfahrt für das Außengeräusch ein Reduktionspotential von mehr als 10 Dezibel im Maximalpegel. Dies entspricht einer Verringerung der wahrgenommenen Lautstärke um die Hälfte. Für den hybriden Betrieb der Plug-In-Hybrid Fahrzeuge ist ebenfalls eine Reduktion zu verzeichnen. Auch im Innengeräusch sind Verringerungen zu verzeichnen, welche positive Effekte für den Fahrkomfort der Passagiere vermuten lassen. Die Ergebnisse der Befragung der Busfahrer zu Geräuschen und Lautstärke der Antriebe geben ebenfalls eine Indikation in diese Richtung.

AP 4.3 Betriebliche Leistungsfähigkeit, Wirtschaftlichkeit (HOCHBAHN, ika)

Für den wirtschaftlichen Betrieb der Fahrzeuge mit alternativen Antriebssystemen besteht die Grundvoraussetzung, dass diese hinsichtlich Ihrer betrieblichen Leistungsfähigkeit verglichen mit

konventionellen Technologien vergleichbar sind. Neben etablierten Indikatoren wie der Verfügbarkeit der Fahrzeuge und der erzielten Laufleistung stellt im vorliegenden Fall die Integration des dezentralen Schnellladekonzeptes in den Betriebsablauf einen wichtigen Untersuchungsgegenstand dar. Aufgrund der Tatsache, dass zum heutigen Zeitpunkt die Batteriekapazität weiterhin ein limitierender Faktor für die Reichweite von elektrisch betriebenen Bussen ist, bleibt dieses Konzept bei der perspektivisch vollständigen Umstellung der Busflotte in Hamburg auf elektrische Antriebe sehr interessant.

Bei der Laufleistung zeigt sich für beide Fahrzeugflotten (jeweils 3 Fahrzeuge) eine Laufleistung von rund 70.000 km innerhalb der ersten 10 Monate, was einer Laufleistung von rund 2600 km je Fahrzeug und Monat entspricht (zum Vgl.: Diesel-Stadtbus Jahreswert bei der HOCHBAHN rund 61.130 Km/Bus in 2017, entsprechend knapp 5.100 Km/Monat und Bus). Für die bereits länger im Betrieb befindlichen Plug-In-Hybrid Fahrzeuge hat sich diese Laufleistung bestätigt und beträgt nunmehr insgesamt 250.000 km innerhalb von 33 Monaten.

Hinsichtlich der Verfügbarkeit ist für die Plug-In-Hybrid-Fahrzeuge ein Anstieg im Laufe des ersten Projektjahres zu verzeichnen. Dies kann ein Indikator der schrittweisen Verbesserung der Technologie sein. Seitdem liegt die durchschnittliche Verfügbarkeit aller drei Fahrzeuge zumeist über 70 %, wobei in einzelnen Monaten für einzelne Fahrzeuge eine Verfügbarkeit von 100 % erzielt wird. Bei den batterieelektrischen Fahrzeugen zeigt sich ein heterogenes Bild mit einer deutlicheren Streuung zwischen den Fahrzeugen eines Typs. Obwohl Verfügbarkeiten von mehr als 90 % für einzelne Fahrzeuge erzielt werden, liegt die mittlere Verfügbarkeit zumeist niedriger. Anders als für die Plug-In-Hybrid-Fahrzeuge liegen hier bislang nur Daten zum ersten Betriebsjahr vor. Diese Daten und Erfahrungen sind aber wichtig, um Verbesserungen ableiten zu können. Nach einem längeren Betrieb und der schrittweisen Behebung aller anfänglich auftretenden kleineren Fehler ist auch hier eine Stabilisierung der Verfügbarkeit auf höherem Niveau zu erwarten. Erfahrungen zur Verbesserung der Verfügbarkeit können nur aus dem Betrieb der Busse abgeleitet werden.

Während des Betriebsablaufs stellt die Integration der Schnellladevorgänge in die Regelprozesse eine zusätzliche Herausforderung gegenüber anderen Technologien dar. Aus diesem Grund werden die Messdaten hinsichtlich dieses Aspektes näher untersucht.

In der nachfolgenden Abbildung ist die Verteilung des Batterieladegrades zu Fahrtbeginn für die ausgewerteten Einzelfahrten dargestellt:

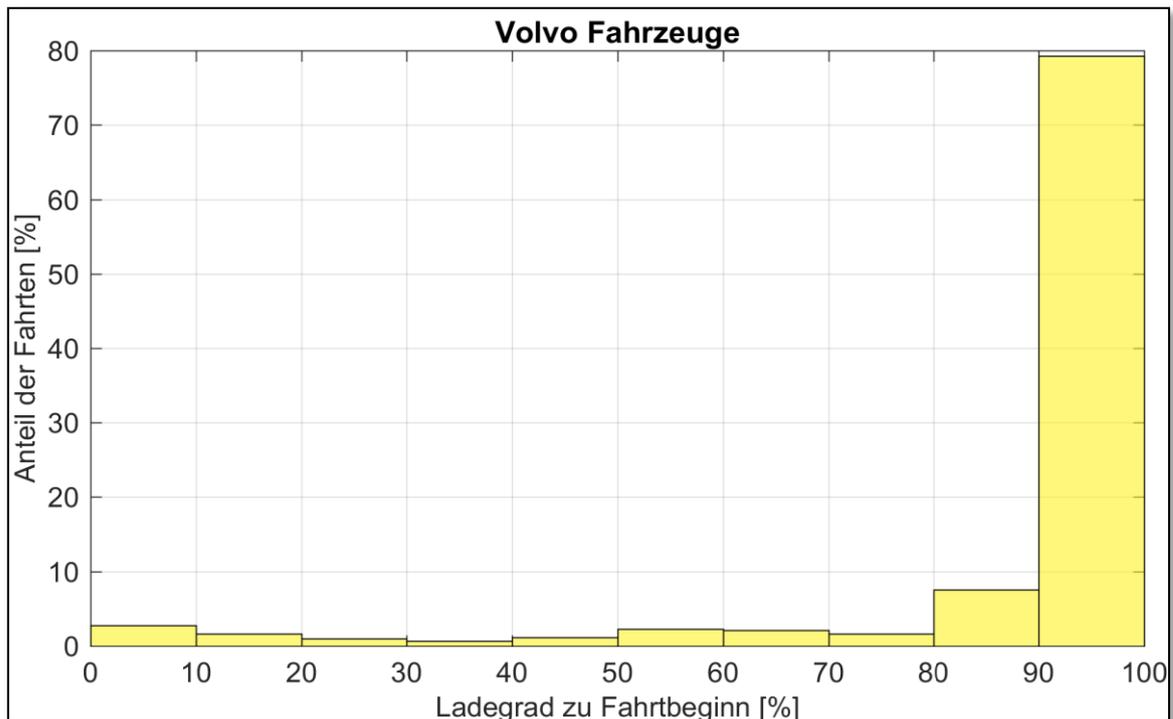


Abb. 14: Ladegrad der Volvo Fahrzeuge während den Einzelfahrten

In der Abbildung ist die Verteilung der Einzelfahrten bezüglich des Ladegrades der Batterie aufgezeigt. Es wird ersichtlich, dass ca. 85 % der Fahrten der Plug-In-Hybrid-Fahrzeuge mit einem Batterieladegrad über 80 % begonnen werden. Im Laufe einer Fahrt zwischen den Ladestationen fällt der Ladegrad stets in den Bereich um 0 % ab bzw. die elektrische Fahrtstrecke liegt unterhalb der Linienlänge. Folglich muss in 85 % der Fahrten ein Ladevorgang der Fahrt voraus gegangen sein. Dies beinhaltet auch das erste Betriebsjahr, in dem sich die Technologie in der Einführung befand und eine Adaptionphase an die Technologie zu erwarten war. Folglich findet bei den Plug-In-Hybrid-Fahrzeugen im überwiegenden Anteil der Aufenthalte an den Endhaltestellen eine Ladung statt. Die Möglichkeit, die Fahrt auch ohne geladene Batterie im verbrennungsmotorischen Betrieb durchzuführen, wird nur selten in Anspruch genommen. Kritischer für einen stabilen Betrieb sind die Ladevorgänge für die batterieelektrischen Fahrzeuge, welche nicht über einen zweiten Antrieb verfügen. Bei diesen Fahrzeugen liegt der Ladegradverlust pro Fahrt in Abhängigkeit der Jahreszeit zwischen etwa 10 % bis 25 % (Batteriekapazität: 100 kWh brutto/90kWh nutzbar, Energiebedarf wie zuvor beschrieben 1,1 kWh/km bzw. > 2,5 kWh/km bei kalten Außentemperaturen). Der Anteil an Fahrten mit einem Ladegrad der Batterie über 80 % liegt wie bei den Plug-In-Hybrid Fahrzeugen bei über 85 %. Ausgehend von einer theoretisch voll geladenen Batterie (100 %) entspricht ein Ladegrad von 80 % demzufolge maximal zwei durchgeführten Fahrten mit einem Ladegradverlust von 10 %. Demzufolge werden auch die batterieelektrischen Fahrzeuge im der Mehrheit der Aufenthalte an den Endhaltestellen laden. Fahrten mit einem Ladegrad zu Fahrtbeginn unterhalb von 50 %, welche eine nachfolgende Ladung zwingend erforderlich machen würden, kommen praktisch nicht vor. Eine Restreichweite von 20 km bzw. 50 %

Ladegraddifferenz unter Winterbedingungen wird gemäß der in der Forschungsbegleitung durchgeführten Fahrerbefragung als Grenze angesehen, unterhalb der eine Nachladung der Fahrzeuge durch die Fahrer bevorzugt wird. Somit zeigt sich, dass die Ladevorgänge ausreichend häufig und erfolgreich zur Aufrechterhaltung eines stabilen Betriebs bei den batterieelektrischen Fahrzeugen, sowie eines möglichst hohen elektrischen Fahranteils bei den Plug-In-Hybrid Fahrzeugen, durchgeführt wurden.

Neben der Ladehäufigkeit erfolgt eine Betrachtung der benötigten Ladedauer. Wie zuvor geschildert, treten kritische Batterieladegrade nicht auf. Dies zeigt sich auch im Verspätungsverhalten zwischen der Endhaltestelle der vorherigen Fahrt und der ersten Haltestelle der nachfolgenden Fahrt, welche unauffällig hinsichtlich der Durchführung von Ladevorgängen oder dem Entfallen ebendieser ist. Gestützt wird dies ferner bei Betrachtung der auftretenden Ladeleistungen. So wird bei beiden Fahrzeugtypen eine Ladedauer von rund sechs Minuten benötigt, um den Ladegradverlust einer Fahrt am Fahrtende wieder auszugleichen. Die tatsächliche Dauer des Ladevorgangs und damit die verfügbare Reserve in nachladbarer Energiemenge liegt zumeist höher, sodass bei der derzeitigen Bemessung des Systems ausreichende Reserven für einen stabilen Betrieb vorliegen.

Die Bewertung durch die Busfahrer stützt hier die vorangegangenen Bewertungen ebenfalls. So wird die Ladung als solche als sinnvoll und die Ladedauer als angemessen empfunden. Die als komfortabel empfundene Mindestrestreichweite wird im Betrieb der batterieelektrischen Busse nicht unterschritten. Gleichwohl gibt die Subjektivbewertung der Technologie Hinweise auf mögliche Optimierungspotentiale in der technischen Ausgestaltung.

Im Verlauf des Jahres 2017 hat sich der Anteil der elektrisch zurückgelegten Strecke bei allen drei Plug-In-Fahrzeugen sehr konstant auf einem Niveau von ca. 50 % bewegt. Damit bestätigen sich die Ergebnisse des Vorjahres weitgehend. Dieser Umstand spiegelt sich auch bei der Auswertung der Ladeprozesse wider. Die Erfolgsquote der Ladeversuche an den Lademasten lag im Jahr 2017 bei 95 %. Die Quote der bereits im ersten Versuch erfolgreichen Ladevorgänge lag 2017 bei 91 %.

Aufgrund der kleinen Batterie der Plug-In-Busse müssen für dieses Ziel alle Teilprozesse vollkommen zuverlässig funktionieren und die erforderlichen betrieblichen Rahmenbedingungen geschaffen werden, um der Batterie die benötigten Energiemengen sicher zur Verfügung stellen zu können. Die Betrachtung der Erfolgsquote bei den Ladevorgängen hat daher direkte Auswirkung auf die Zuverlässigkeit der Fahrzeuge im Regelbetrieb, sofern der elektrische Fahranteil möglichst hoch gehalten werden soll.

Die rein elektrisch betriebenen Batteriebusse haben mit 2017 das erste vollständige Kalenderjahr im Betrieb absolviert. Die Erfolgsquote der Ladeversuche an den Lademasten lag im Jahr 2017 bei 95 %. Die Quote der bereits im ersten Versuch erfolgreichen Ladevorgänge lag 2017 bei 71 %. Im Vergleich zu den Plug-In-Bussen besteht hier noch Nachbesserungsbedarf.

Dieser Umstand ist aber voraussichtlich der kürzeren Betriebszeit und damit der noch steigenden Lernkurve auf Seiten von Fahrzeug- und Infrastrukturhersteller sowie der HOCHBAHN als Betreiber zuzuschreiben.

AP 4.4 Übertragbarkeit auf andere Linien bzw. Linienbündel (HOCHBAHN)

Über den im Rahmen des HELD Projektes durchgeführten Feldtest hinaus soll der Einsatz des Systems von dezentraler Schnelllade-Infrastruktur auf anderen Buslinien im Netz der HOCHBAHN betrachtet werden. Hierfür werden Simulationsmodelle der Fahrzeuge, Ladeinfrastruktur und der Linienverläufe erstellt und mithilfe der vorliegenden Messdaten aus den Messzeiträumen parametrisiert. Anschließend ermöglichen die Modelle eine virtuelle Betrachtung neuer Einsatzszenarien sowie die Auswirkung einer Anpassung der Systemparameter.

Bei dem variierten fahrzeugtechnischen Systemparameter der Plug-In-Hybrid-Fahrzeuge handelt es sich gemäß der Vorhabensbeschreibung der Forschungsbegleitung um die Batteriekapazität. Der Einsatz eines Plug-In-Systems für elektrisch angetriebene Stadtbusse adressiert das Ziel, die Batteriekapazität unter den für einen ganztägigen Betrieb erforderlichen Energieinhalt zu verringern. Eine solche Verringerung der Batteriekapazität unterliegt mehreren Zielkonflikten:

Positive Auswirkungen:

- Geringere Kapazität resultiert in niedrigeren Anschaffungskosten, welche im Nutzfahrzeugsektor ein wichtiges Kriterium für die Wettbewerbsfähigkeit der Technologien darstellen.
- Geringeres Fahrzeuggewicht sorgt für geringere Fahrwiderstände und damit einen geringeren Energiebedarf, welcher folglich die (globalen) CO₂ Emissionen verringert.
- Bei vorhandener Ladeinfrastruktur können die elektrischen Fahranteile von Hybridfahrzeugen gesteigert und damit der verbleibende Verbrauch an Dieselmotorkraftstoff verringert werden.

Negative Auswirkungen:

- Die Verringerung der Batteriekapazität macht Ladevorgänge obligatorisch. Diese müssen in den Betriebsablauf eingebettet werden. Ferner ist die Ladeinfrastruktur vorzuhalten.
- Erhöhung der relativen Belastung der Komponente. Die erforderliche Antriebsleistung sinkt nicht in gleichem Maße wie die Leistungsfähigkeit der Batterie durch die Abnahme des Fahrzeuggewichtes. In der Folge wird die Batterie mit einer höheren relativen Leistung belastet sowie bei gleichbleibender Fahrstrecke in einem höheren Maße entladen. Beide Einflüsse verringern tendenziell die Lebensdauer der Komponente.

In der Folge zur Untersuchung des Einflusses einer Variation der Batteriekapazität wurde insbesondere eine Betrachtung der Erhöhung der Kapazität ausgehend vom technischen Status Quo der im Projekt eingesetzten Fahrzeuge betrachtet. Hierdurch kann im Falle der hybriden Fahrzeuge der Anteil verbrennungsmotorisch zurückgelegter Fahranteile verringert werden und im Falle der batterieelektrischen Fahrzeuge die Nutzbarkeit auf andere Linien erweitert werden.

Aus der simulativen Betrachtung typischer Fahrprofile aus den Messdaten mit verschiedenen Batteriekapazitäten wird ersichtlich, dass eine Steigerung der nominalen Batteriekapazität um 25 % bereits bei einem wenig anspruchsvollen Fahrprofil (Vormittags, Stadtauswärts, gemäßigte Außentemperatur) eine vollständig elektrische Fahrt zwischen den Ladungen ermöglicht. Bei einer Steigerung des Energieinhaltes um 70 % können auch energetisch anspruchsvolle Fahrten auf der betrachteten Linie vollelektrisch zurückgelegt werden. Ferner kann mit der gesteigerten Batteriekapazität für energetisch günstigere Fahrten der genutzte Bereich der Batterie verringert werden. Trotz einer Zunahme des Fahrzeuggewichtes steigt die Bedarfsleistung nicht in gleichem Maße an, sodass die relative Belastung der Batterie sinkt. Hierdurch sind positive Effekte auf die Batterielebensdauer zu erwarten. Ferner kann bei der untersuchten Vergrößerung der Batteriekapazität die Nachladedauer konstant gehalten werden, da die Ladeinfrastruktur höhere Ladeleistungen zulässt als derzeit genutzt werden. Hiermit ist die relative Belastung der Batterie während der Nachladevorgänge ebenfalls konstant gehalten. Eine Substitution der zunehmend entfallenden Abwärme des Verbrennungsmotors durch elektrische Energie statt durch Heizöl ist in der Betrachtung nicht enthalten. Aus den Betrachtungen im vorherigen Abschnitt folgt die Vermutung, dass für die im Projekt eingesetzten Plug-In-Hybrid-Fahrzeuge die entfallende Motorwärme durch einen höheren Heizölbedarf kompensiert wird und das (elektrische) Fahrverhalten (Fahranteile/Reichweite) unverändert bleibt. Dies erscheint angesichts der derzeitigen Bereitstellungssituation elektrischer Energie im Stromnetz sinnvoll. Eine Aussage über das Verhältnis aus noch nutzbarer Abwärme und Wärmemenge durch die Zusatzheizung ist bei den Fahrzeugen nicht möglich, sodass hier in erster Näherung vom einen Anstieg des Energiebedarfs in Analogie zu den batterieelektrischen Fahrzeugen zu rechnen ist.

Für die Übertragbarkeit auf andere Linien wurden von der HOCHBAHN Fahrplandaten in Format der General Transit Feed Specification (GTFS) zur Verfügung gestellt. Diese beinhalten die Einzelfahrten im Netz der HOCHBAHN inklusive der Informationen zum Streckenverlauf und dem zeitlichen Fahrplan. Legt man nun einen elektrischen Energiebedarf für Solobusse gemäß der Erkenntnisse aus Abschnitt AP 4.2 zwischen minimal 1 kWh/km und maximal 2,5 kWh/km zugrunde, so können mit Plug-In-Hybrid Fahrzeugen ohne Heizöl-betriebene Innenraumheizung und der installierten Batteriekapazität rein elektrische Fahrstrecken zwischen ca. 3,5 km und 8,5 km zurück gelegt werden. Dies folgt der Annahme, dass der spezifische Energiebedarf der Linien identisch zur betrachteten Linie 109 ist. Die Linie stellt eine Innenstadtlinie dar, die durch geringe Durchschnittsgeschwindigkeiten und häufige Halte gekennzeichnet ist. Der Energiebedarf auf anderen Linien kann hiervon abweichen. Die Art der Abweichung hängt von mehreren divergierenden Faktoren ab. Hierunter fallen beispielsweise Stillstandsphasen, welche die

Relevanz des Leerlaufverbrauchs erhöhen, die Fahrgastzahlen oder die Durchschnittsgeschwindigkeit, welche die Fahrwiderstände und damit den Energiebedarf erhöhen.

Im Rahmen der Forschungsbegleitung wurden die Fahrprofile der Fahrzeuge und der Linienbetrieb auf der Linie 109 untersucht. Charakteristische Größen, welche den Energiebedarf der Fahrzeuge beeinflussen, wie etwa die Außentemperatur, die Fahrweise und der Linienverlauf wurden analysiert. Anschließend wurden diese Größen auf den Verlauf einer weiteren Linie übertragen, um den Energiebedarf der Fahrzeuge zu extrapolieren. Es können sowohl die Schwankungen in den Einzelfahrten als auch Schwankungen aufgrund der Umgebungsbedingungen dargestellt werden. Als betrachtete Vergleichs-Linie wurde die Metrobus-Linie M5 gewählt, da diese einerseits eine andere Charakteristik besitzt (Größere Linienlänge, Betrieb zum Großteil auf Bussonderfahrstreifen) andererseits aber über dieselbe Endhaltestelle verfügt (Hauptbahnhof/ZOB) und somit prinzipiell eine (Teil-) Nutzung der bereits vorhandenen Ladeinfrastruktur denkbar ist. In der folgenden Abbildung ist ein exemplarisches Simulationsergebnis dargestellt:

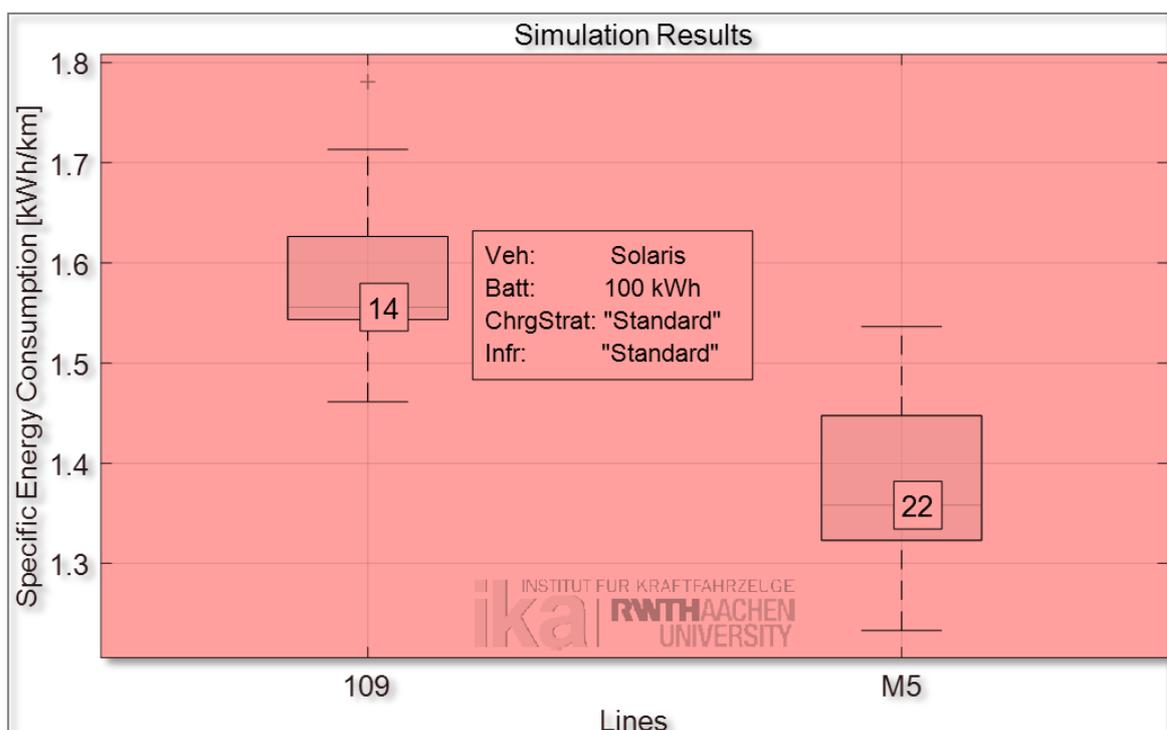


Abb. 15: Simulierter Streckenenergiebedarf der batterieelektrischen Fahrzeuge

Die Zahlen innerhalb der weißen Boxen stellen erneut die Anzahl der zugrundeliegenden Einzelfahrten dar, jedoch im vorliegenden Fall aus der Simulation. Zu erkennen ist, dass der simulierte Streckenenergiebedarf auf der Linie M5 mit der abweichenden Liniencharakteristik bei gleichen Umgebungsbedingungen (Außentemperaturverlauf) im Mittel unterhalb des simulierten Energiebedarfs auf der Linie 109 liegt. Die Simulation verwendet dabei auf Basis der Messdaten abgegliche Simulationenmodelle der im Feldversuch eingesetzten 12 m Fahrzeuge.

Im derzeitigen realen Betrieb werden auf der Linie jedoch 21 m Fahrzeuge eingesetzt, für welche der Absolutwert des streckenbezogenen Kraftstoffbedarfs abweichen kann. Die hier dargestellte relative Aussage zum Vergleich des Verhaltens derselben Antriebstechnologie im selben Fahrzeugtyp auf verschiedenen Linien gilt für den vorhandenen Fahrzeugtyp. Dies ist auf die verschiedenen Streckencharakteristiken zurück zu führen. Die Linie 109 ist eine Innenstadtlinie mit hoher Dichte an Halten und geringer Durchschnittsgeschwindigkeit. Aus diesem Grund können die oben genannten Energieverbräuche als konservative Abschätzung für einen Solobus im elektrischen Betrieb bei der Betrachtung des gesamten Netzes angesehen werden.

Von den Plug-in-Hybridfahrzeugen (Energiebedarf: 1,0 kWh/km, kombiniert aus elektrischem Energiebedarf und Heizöl, kein Dieselbetrieb), 8,5 km Reichweite), können 35 von 110 betrachteten Linien bereits bedient werden. Dieser geringe Streckenergiebedarf wird bei gemäßigten Außentemperaturen (zwischen ca. 10 °C und 20 °C) und entsprechender Fahrweise/Besetzung) erzielt. Legt man die maximale Ladeleistung der Infrastruktur von 300 kW zugrunde, so ergibt sich bei einer unveränderten Ladedauer von 6 min eine nachladbare Energiemenge von 30 kWh. Umgelegt auf den ermittelten Energiebedarf ergibt sich damit eine Linienlänge von 30 km, welche bei entsprechender Batteriekapazität vollelektrisch (ideale Bedingungen: minimaler Energiebedarf, andernfalls wird der Einsatz von Diesel bzw. Heizöl erforderlich) zurückgelegt werden kann. Dies entspricht 108 Linien im Netz der HOCHBAHN.

Für die batterieelektrischen Fahrzeuge kann die gleiche Energiemenge nachgeladen werden. Legt man den maximalen Streckenergiebedarf (Worst-Case Bedingung: Einsatz von Diesel oder Heizöl zur Erhöhung der Reichweite/Fortsetzen der Fahrt andernfalls nicht möglich) zugrunde, so kann im derzeitigen Ladekonzept eine Reichweite von 12 km (30 kWh Energie, 2,5 kWh/km Energiebedarf) nachgeladen werden. Dies ermöglicht einen ganzjährigen Betrieb der batterieelektrischen Fahrzeuge, unabhängig von den Außenbedingungen, auf 60 Linien.

Die Betrachtung der Anzahl geeigneter Buslinien anhand der Streckenlänge (und damit dem absoluten Energiebedarf) gibt eine Indikation für den Umfang der zu errichtenden dezentralen Infrastruktur. Darüber hinaus gibt der zahlenmäßige Anteil der Einzelfahrten, insbesondere aber der hierauf entfallende Anteil der Wegstrecke eine Indikation der potentiellen Einsparungen für den Gesamtenergiebedarf bzw. den CO₂-Emissionen aus den zuvor stehenden Betrachtungen. Betrachtet man sämtliche Fahrten auf allen Linien, so liegen ca. 42 % der Fahrten bzw. 23 % der Gesamtstrecke unterhalb von 8,5 km, für Linienlängen von 12 km ergeben sich 68 % bzw. 48 % und für eine Linienlänge von 30 km entsprechend 99 % und 96 %. Folglich hängt die Anzahl der durch die vorhandenen Fahrzeuge bedienbaren Linienverläufe in hohem Maße von den Außenbedingungen ab.

Die zuvor genannten Betrachtungen zu erzielbaren Reichweiten bzw. abgedeckten Streckenlängen auf Basis des Streckenergiebedarfs stellen Maximalbetrachtungen unter der Annahme einer vollständigen Nutzung der Batteriekapazität für eine Einzelfahrt dar. In der

Praxis ergeben sich weitere Aspekte, welche die Anforderungen an die Batteriekapazität erhöhen oder alternativ die Reichweite absenken:

- Einhalten der gemäß der Befragung bevorzugten Restreichweite am Ende der Fahrt
- Erreichbarkeit des Busdepots im Fehlerfall
- Toleranz gegenüber dem Entfall ein- oder mehrere Ladevorgänge

Im Allgemeinen liegt die physikalisch installierte Batteriekapazität über der technisch nutzbaren Batteriekapazität. Das Verhältnis dieser beiden Werte hängt vom installierten Batterietyp und der Betriebsstrategie zur Erreichung einer bestimmten Batterielebensdauer ab. Die entsprechenden Werte unterliegen der Geheimhaltung der Hersteller.

Wie zuvor geschildert, steigt der Energiebedarf im Winter an, was bei gleich bleibender Batteriekapazität die Reichweite absenken kann. Die Ausrüstung batterieelektrischer Fahrzeuge mit fossilen Zusatzheizern stellt eine mögliche Alternative dar. Hierdurch entfallen die derzeit hohen CO₂-Entstehungskosten bei der Erzeugung der elektrischen Energie sowie die doppelte Energiewandlung im Fahrzeug. Dies kann somit einer Übergangslösung darstellen, bis größere Energiedichten der Batterien verfügbar sind. Für den Sommerfall kann es jedoch weiterhin aufgrund des ebenfalls ansteigenden Energiebedarfs für die Klimatisierung zu einer geringeren Nutzbarkeit kommen.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass die in den im Rahmen des HELD-Projekts eingesetzten Fahrzeugen verwendeten Batterien zwar ausreichend dimensioniert sind, um einen relevanten Anteil des Busliniennetzes bei der HOCHBAHN zu elektrifizieren. Hierzu sind aber einige Rahmenbedingungen zu berücksichtigen:

- Linien müssen unter den gegebenen Voraussetzungen grundsätzlich an beiden Linienenden mit Ladeinfrastruktur ausgestattet werden.
- Unter Vernachlässigung der Heiz- und Klimatisierungsthematik ist zumindest die Reichweite der BEV-Fahrzeuge unter vollständiger Ausnutzung der Nachladereserven der Ladeinfrastruktur ausreichend groß, um die meisten (99 %) der Linien bedienen zu können. Vor dem Hintergrund, dass aber in diesem Szenario sämtliche Systemreserven ausgereizt werden (Ladezeiten und –leistung, Reichweitenreserven), ist ein Regelbetrieb unter diesen Rahmenbedingungen kaum vorstellbar
- Sofern elektrisch geheizt bzw. klimatisiert werden soll, ist die Batteriekapazität sämtlicher im Rahmen des Projekts eingesetzten Fahrzeuge faktisch zu gering. Dies macht den Einsatz von fossilen Heizungen und den Verzicht auf Klimatisierung erforderlich.

In der Gesamtbewertung ist festzustellen, dass die Reichweiten der untersuchten Fahrzeuge nicht ausreichend groß sind, um auf dieser Basis die Busflotte der HOCHBAHN auf vollelektrische Antriebe umzustellen. Neben den – wie zuvor erwähnt – sehr knappen Reserven auch bei den

BEV und der Heiz- und Klimatisierungsproblematik muss auch noch auf zwei weitere Aspekte hingewiesen werden:

1. Der Bedarf an dezentraler Ladeinfrastruktur ist bei Einsatz von mit den hier betrachteten Fahrzeugen vergleichbaren Batteriekapazitäten sehr groß. Es muss in erster Näherung davon ausgegangen werden, dass an nahezu allen Linienenden (sowie teilweise an Zwischenendpunkten) Ladeinfrastruktur benötigt wird. Dies ist – auch unter Vernachlässigung der hohen Kosten – eine sehr große Herausforderung. Neben den rein räumlichen Schwierigkeiten, im knappen öffentlichen Raum in so großer Zahl Lademasten zu errichten, die von Bussen präzise und störungsfrei angefahren werden können, ist auch davon auszugehen, dass die öffentliche Wahrnehmung eine große Anzahl von Lademasten im städtischen Raum kritisch sieht.
2. Aufgrund der Tatsache, dass die Fahrzeug-Einsatzpläne bei der HOCHBAHN in der Regel nicht linienrein sind, wechseln Fahrzeuge im täglichen Betrieb regelmäßig zwischen verschiedenen Linien. Ladezeiten müssen aufgrund der geringen Reichweite dann auch für betriebliche Fahrten bei Linienwechsel eingeplant werden.

Auf der anderen Seite hat sich das Gesamtsystem dezentrales Nachladen im mittlerweile drei Jahre andauernden Praxisbetrieb als grundsätzlich belastbar und zuverlässig herausgestellt. In der Kombination mit deutlich größeren Batteriekapazitäten, die mittlerweile am Markt angeboten werden, ist das hier verfolgte Betriebskonzept für batterieelektrische Fahrzeuge durchaus vielversprechend, um die Lücke zu füllen, die reine Depotlader aufgrund ihrer begrenzten Reichweite derzeit noch hinterlassen.

Eine umfassende Untersuchung möglicher für den Betrieb mit dezentraler Ladeinfrastruktur geeigneter Teilnetze im Busverkehr der HOCHBAHN sowie der dafür erforderliche Infrastrukturaufwand wurden im Forschungsprojekt BEEDeL (Förderkennzeichen 03EM0205) untersucht.

AP 4.5 Administrative Aufgaben, Kommunikation (hySOLUTIONS)

AP 4.5.1 Administrative Aufgaben

In diesem Arbeitspaket wurden alle administrativen Aufgaben (Nachweise, Berichte etc.) zusammengefasst. Hierzu gehörte:

- das kontinuierliche Abstimmen mit den beteiligten Projektpartnern VOLVO, SOLARIS, SIEMENS und ika,
- die Protokollierung und Berichterstattung zum aktuellen Sachstand sowie
- der regelmäßige Abgleich des Projektfortschrittes in den jeweiligen Arbeitspaketen.

Mit der Auslieferung der Batteriebusse von SOLARIS im Sommer 2016 ist mit SOLARIS ein weiterer Abstimmungspartner hinzugekommen, der regelhaft in die Projektbesprechungen einbezogen wurde.

AP 4.5.2 Kommunikation

Mit der Auslieferung der Plug-in-Busse Ende 2014 im Rahmen des HELD-Projektes und der Batteriebusse mit Brennstoffzelle als Range-Extender im Rahmen des Projektes NaBuZ demo (gefördert durch BMVI, Förderkennzeichen 03BV223A) entschied die HOCHBAHN, alle Fahrzeuge mit innovativen Antrieben gemeinsam auf einer Linie zu testen und eine verknüpfte Kommunikationsstrategie umzusetzen. Ziel war es, eine durchgängige Botschaft „Unser Antrieb für Hamburg. HOCHBAHN VisionAir.“ an alle Zielgruppen zu kommunizieren und so noch mehr Wahrnehmung zu erhalten.

Am 18. Dezember 2014 eröffneten Olaf Scholz (Erster Bürgermeister der Freien und Hansestadt Hamburg), Frank Horch (Senator für Wirtschaft, Verkehr und Innovation Hamburgs), Rainer Bomba (Staatssekretär BMVI) und Dr. Ewold Seeba (Abteilungsleiter BMUB) gemeinsam mit dem Vorstand der HOCHBAHN feierlich die Innovationslinie 109.



*Abb. 16: Eröffnungsveranstaltung Innovationslinie 109
(von links: Senator Horch, Vorstandsvorsitzender der HOCHBAHN Günter Elste,
1. Bürgermeister Hamburgs Olaf Scholz) am 18.12.2014*

Die Kommunikation zu den Plug-in und Batteriebussen fand entsprechend im Rahmen der Kommunikationsstrategie zur Innovationslinie 109 statt und wurde in drei Ebenen unterteilt:

1. Ebene – Einstieg für alle Zielgruppen,
2. Ebene – Grobeinteilung der Fahrzeuge für interessierte Laien und
3. Ebene – Beschreibung der Technologien für besonders Interessierte.

Dabei wurde gezielt auf das Erleben der unterschiedlichen Antriebstechnologien der Fahrzeuge Wert gelegt.



Abb. 17: Busflotte der HOCHBAHN mit innovativen Antrieben

Die Informationsaufbereitung erfolgte zielgruppenorientiert, so dass sowohl das Interesse von Laien geweckt, aber auch für Experten noch interessante Neuigkeiten bereitgestellt werden konnten. Folgende Zielgruppen für Kommunikationsmaßnahmen wurden identifiziert:

- **Verkehrsbetriebe** als künftige Nutzer und potenzielle Besteller von Brennstoffzellenhybridbussen,
- **Politiker und die Aufgabenträger** als die Entscheider über die Bestellung von Nahverkehrsleistungen und die für die Fahrzeuge geltenden Qualitätsstandards,
- **Technische Experten und Meinungsbildner** die maßgeblich zur Bewertung der technologischen Reife der Fahrzeuge und damit zu ihrer Akzeptanz am Markt beitragen,
- **Fahrgäste des ÖPNV**, die als erstes im täglichen Betrieb die nutzerbezogenen Vorteile der Hybridbusse wahrnehmen (Fahrkomfort, leiser Betrieb etc.)

Zu den wesentlichen Maßnahmen der Kommunikation und Öffentlichkeitsarbeit gehörten:

- Spezielles Branding unter anderem im Außendesign der innovativen Busse, um diese in der Wahrnehmung für Fahrgäste und Passanten besonders herauszustellen,
- zusätzlicher Einsatz von Plakaten und Monitoren in den Fahrzeugen zur Erläuterung der eingesetzten Technologien,
- regelmäßige aktualisierte Berichte über die neuen Fahrzeuge und die mit ihrem Einsatz erreichten Klimaschutzvorteile auf der Website der HOCHBAHN (www.hochbahn.de) sowie im Fahrgastfernsehen in der U-Bahn oder im Bus,
- gemeinsame Darstellungen der eingesetzten innovativen Busse auf thematisch passenden Veranstaltungen etwa zum Klimaschutz mit geeigneten Medien (Aufsteller etc.), sowie bei Fachmessen und allgemeinen öffentlichen Veranstaltungen,
- Durchführung von Besucherprogrammen, um ein Gefühl für die neue Technik zu vermitteln und diese erlebbar zu gestalten.

Außerdem nutzt HOCHBAHN das gesamte Portfolio der Informationsinstrumente bis hin zu den sozialen Medien wie Facebook (www.facebook.com/hochbahn) oder Twitter (www.twitter.com/hochbahn). Die im Konzern eingesetzten Busse mit innovativen Antrieben

wurden regelmäßig in der Tagespresse bzw. dem lokalen Fernsehen vorgestellt und über ihren Entwicklungsfortschritt berichtet.



Abb. 18: Batteriebus unterwegs in Hamburg (Quelle: SOLARIS)

AP 4.5.2.1 Filme zur Innovationslinie 109

Im Rahmen der Gesamtkommunikation zur Innovationslinie 109 wurden Animationsfilme zur vereinfachten Darstellung des Antriebs der einzelnen Fahrzeuge erstellt. Diese Filme sind über die Internetseite der HOCHBAHN einsehbar und wurden auch über Bildschirme in den Bussen gezeigt.

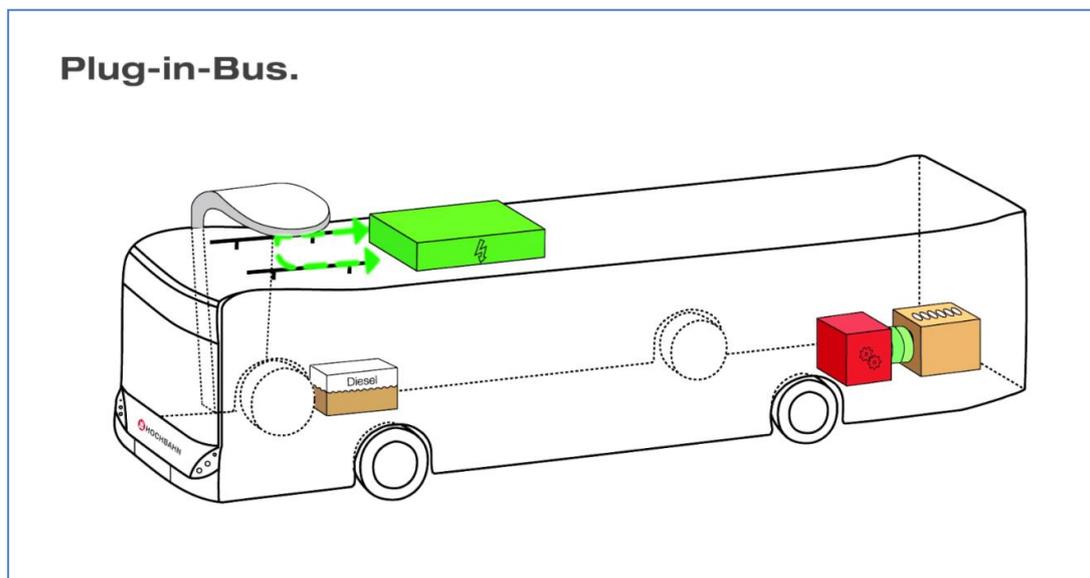


Abb. 19: Animation zur Antriebstechnologie des Plug-in-Busses (Innovationslinie 109)

AP 4.5.2.2 Informationsblätter und technische Datenblätter

Im Rahmen der Innovationslinie 109 wurden Informationsblätter erstellt, die vor allem auf Veranstaltungen zum Einsatz kamen und kompakte Informationen zu den Fahrzeugen lieferten. Die technischen Datenblätter standen zum Download zur Verfügung und wurden auch auf Veranstaltungen an besonders interessierte Besucher oder Experten verteilt. Sie umfassten sowohl die Eckdaten zum Bus als auch Informationen zur Antriebstechnologie.



Abb. 20: Vorder- und Rückseite des technischen Datenblattes zum Batteriebus

Im Verlauf des Projektes war zu geeigneter Zeit ein Flyer zu erstellen, der einen Zwischensachstand zum Projekt abbildet und an die Öffentlichkeit verteilt werden kann. In Absprache mit dem Fördergeber wurde beschlossen, die Datenblätter zu jedem Bus anstelle eines Flyers zu nutzen. Alle Datenblätter liegen seit August 2016 vor und werden an interessierte Besucher mit Fachhintergrund abgegeben.

AP 4.5.2.3 Veranstaltungen und Besucherprogramme

Im Rahmen einer Vielzahl von Veranstaltungen wurden die Plug-in-Busse und die Batteriebusse der Öffentlichkeit vorgestellt. Neben offiziellen Terminen wie dem Start der Innovationslinie 109 im Dezember 2014 gab es diverse weitere Anlässe zur Präsentation der Fahrzeuge im Zuge von Sonderfahrten mit hochrangigen Personen und Multiplikatoren. Folgende Veranstaltungen können exemplarisch als ausgewählte Beispiele genannt werden:

- VDV Jahrestagung in Berlin
- Shuttle im Rahmen der National Maritime Conference
- Transfer im Rahmen der Verkehrsministerkonferenz 2017 in Hamburg
- Sonderfahrt im Rahmen der EU Interreg Baltic Sea Region Project SUMBA (Sustainable Urban Mobility and Commuting in Baltic Cities)
- Innotrans
- Treffen mit Vertretern der LAG Hamburger Landesarbeitsgemeinschaft für behinderte Menschen e.V. und dem BSVH Blinden- und Sehbehindertenverband Hamburg im April 2018

Anfang 2015 wurde das HOCHBAHN-Besucherprogramm „Blick hinter die Kulissen“ um den Teil „Innovationslinie 109“ ergänzt. Dadurch konnten viele Besucher erreicht und die Informationen zur Innovationslinie 109 breit gestreut werden. Die Besucher erhalten neben einem Überblick über die HOCHBAHN allgemein und den Bereich U-Bahn auch Informationen zur Innovationslinie 109 und den dort eingesetzten Bussen und ihre besondere Technologie.

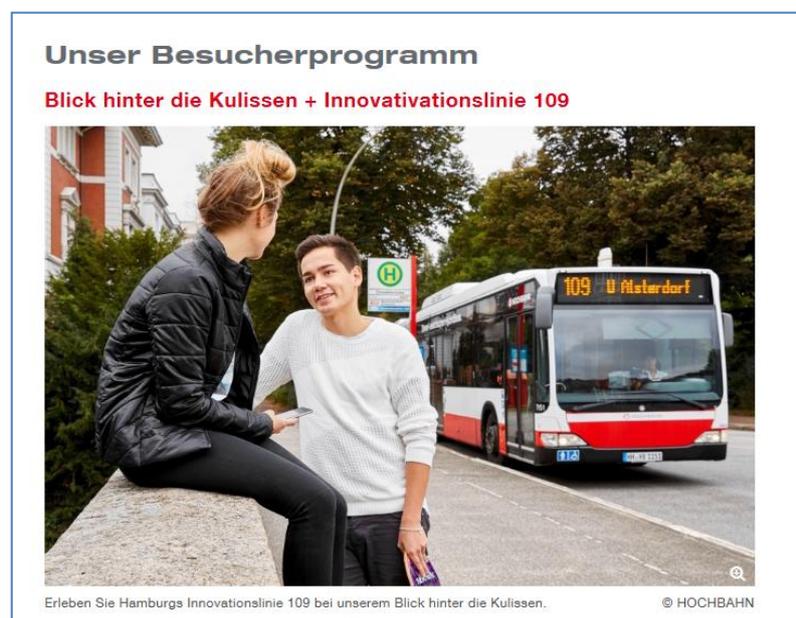
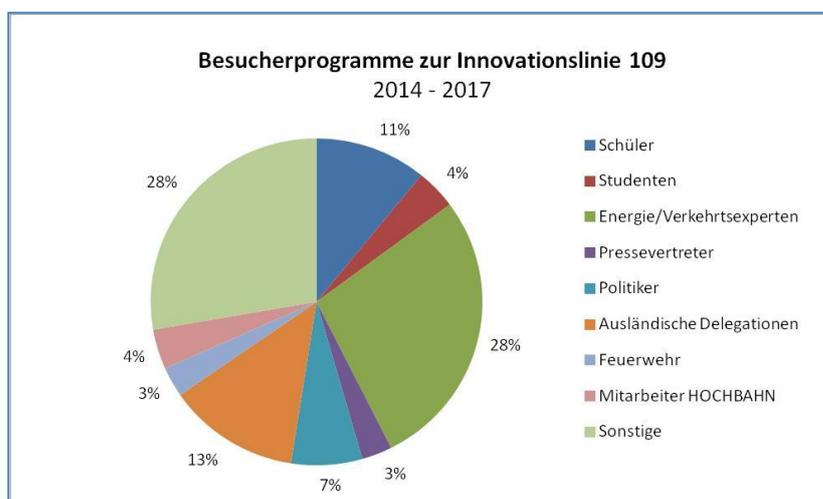


Abb. 21: Hinweis auf HOCHBAHN Website zum Besucherprogramm



Insgesamt haben über den Projektzeitraum hinweg betrachtet 6.616 Besucherinnen und Besucher an Führungen und Programmen teilgenommen.

Abb. 22: Besucherprogramme zur Innovationslinie 109

Die Besucherprogramme wurden über die Internetseite der HOCHBAHN unter dem Stichpunkt „Innovationslinie 109“ beworben. In den Jahren 2014 und 2015 haben im Durchschnitt 5.000 Besucher die Seite betrachtet. In 2016 konnten 8.400 Seitenaufrufe gezählt werden, in 2017 6.100 Seitenaufrufe.

4. Wesentliche Abweichungen zum Arbeitsplan

Es haben sich während der Laufzeit des Vorhabens keine wesentlichen Abweichungen zum Arbeitsplan ergeben.

5. Vergleich der Projektergebnisse zum internationalen Stand der Technik

Es zeigt sich, dass die von den Herstellern in Aussicht gestellten Batteriekapazitäten für die ersten serienmäßig verfügbaren reinen batterie-elektrischen Busse größer sind, als dies zu Beginn des Projekts abzusehen war. Vor diesem Hintergrund ist bei der HOCHBAHN derzeit noch nicht abschließend geklärt, welche Rolle vor allem die dezentrale Ladeinfrastruktur an Linienenden im Rahmen der Elektrifizierung des Busnetzes tatsächlich haben wird. Grundsätzlich werden aber in den nächsten Jahren Busse beschafft, die allein auf dem Betriebshof mit der benötigten Energie versorgt werden. Dazu werden diese in den kommenden Jahren mit der entsprechenden Ladeinfrastruktur sowie dem erforderlichen Netzanschluss ausgestattet.

Zum aktuellen Zeitpunkt verfolgt die HOCHBAHN die Strategie, bei der ab 2020 ausschließlichen Beschaffung von Batterie-elektrischen Bussen so lange wie möglich das reine Über-Nacht-Laden zu verfolgen. Je nach Entwicklung der Batteriekapazität am Markt wird für die vollständige Elektrifizierung des Busnetzes dann die im Rahmen des Projekts erprobte und als geeignet bewertete Technologie des dezentralen Ladens ggf. ergänzend eingesetzt.

6. Zukunftsaussichten und weiterer F&E-Bedarf

Wesentliche Ergebnisse des Projektes, vor allem die Erkenntnisse über die Leistungsfähigkeit und Zuverlässigkeit des getesteten Systems (vor allem im Zusammenspiel zwischen BEV und Ladeinfrastruktur) haben direkten Einfluss auf die anstehenden Entscheidungen bei der HOCHBAHN im Hinblick auf die strategische Ausrichtung bei der Elektrifizierung des Busnetzes. Auf Basis der erzielten Projektergebnisse wird die Technologie des dezentralen Ladens grundsätzlich als mögliche Option für die Elektrifizierung von anspruchsvollen Busumläufen in Hamburg gesehen. Vor diesem Hintergrund ist die Verwertbarkeit der Projektergebnisse als sehr hoch einzustufen.

Auch nach dem Ende des Förderzeitraumes arbeiten die Projektbeteiligten 2018 weiter an der Optimierung der Fahrzeuge und des Ladesystems. Bis in den Spätsommer 2018 sind bereits entsprechende Projektarbeiten und –treffen vereinbart.

7. Beitrag zu den förderpolitischen Zielen des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB)

„Der Verkehrsbereich muss seinen Beitrag zur Umsetzung des Energiekonzepts der Bundesregierung leisten. Kernziel für den Verkehrssektor ist die Reduzierung des Endenergieverbrauchs bis 2020 um rund 10 % und bis 2050 um rund 40 % gegenüber 2005. Die wesentlichen Voraussetzungen für das Erreichen der Ziele sind die Diversifizierung der Energiebasis des Verkehrs mit alternativen Kraftstoffen in Verbindung mit innovativen Antriebstechnologien, die weitere Steigerung der Energieeffizienz von Verbrennungsmotoren und die Optimierung der Verkehrsabläufe (aus: Die Mobilitäts- und Kraftstoffstrategie der Bundesregierung (MKS) Energie auf neuen Wegen, BMVBS 2013, S. 6).“ Das heißt, ohne einen wachsenden Einsatz elektrisch angetriebener Fahrzeuge werden die klima- und energiepolitischen Ziele der Bundesregierung kaum erreicht werden.

Die intensive und erfolgreiche Zusammenarbeit in diesem Projekt von Anwendern, Fahrzeug- sowie Infrastrukturherstellern hat dazu beigetragen, PHEV und BEV hinsichtlich der Aspekte Verfügbarkeit, Reichweite und Flexibilität zielgerichtet weiter zu entwickeln.

Außerdem wurden wichtige Erkenntnisse zur Einschätzung des künftigen Marktes für innovative Linienbusse generiert.

8. Veröffentlichung von Ergebnissen

Im Rahmen von Vorträgen der HOCHBAHN auf Fachkonferenzen wurde wiederholt über die geplante Elektrifizierung des Busnetzes in Hamburg berichtet. Da einige zentrale Erkenntnisse des HELD-Projekts direkten Einfluss auf die anstehenden Entscheidungen zur Elektrifizierung haben, wurden diese in genannten Vorträgen dargestellt. Eine Veröffentlichung zentraler Ergebnisse des Projekts auf Basis des vorliegenden Schlussberichts ist bisher nicht erfolgt.