

Arbeitsgruppe Innovative Antriebe Bus



>> STATUSBERICHT 2015/16 HYBRID- UND ELEKTROBUS-PROJEKTE IN DEUTSCHLAND

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Verkehr und
digitale Infrastruktur

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Umwelt, Naturschutz,
Bau und Reaktorsicherheit

Koordiniert durch:



>> INHALT

>> 1	EINFÜHRUNG: ARBEITSGRUPPE INNOVATIVE ANTRIEBE BUS	4
1.1	INHALTE DER AG INNOVATIVE ANTRIEBE BUS	7
1.2	DATENERFASSUNG	9
1.3	BETRACHTETE TECHNOLOGIEN	10
1.3.1	DIESELHYBRID	10
1.3.2	BATTERIEBUSSE	12
1.3.3	WERKSTÄTTEN UND MITARBEITERSCHULUNG	15
>> 2	ERGEBNISSE	17
2.1	PRAXISTAUGLICHKEIT UND EINSATZREIFE	17
2.1.1	LAUFLEISTUNG	17
2.1.2	VERFÜGBARKEIT	23
2.1.3	ERGÄNZENDE ERGEBNISSE AUS EINZELVORHABEN ZU BATTERIEBUSSEN	30
2.2	ENERGIEEFFIZIENZ/KRAFTSTOFFVERBRAUCH	33
2.2.1	LINIENCHARAKTERISTIK UND KLIMATISCHE BEDINGUNGEN	34
2.2.2	ERZIELTE KRAFTSTOFFEINSPARUNGEN BEIM DIESELHYBRID	36
2.2.3	EINFLUSS LINIENCHARAKTERISTIK AUF ENERGIEVERBRAUCH	38
2.2.4	EINFLUSS KLIMATISCHER BEDINGUNGEN AUF ENERGIEVERBRAUCH	45
2.2.5	ERGÄNZENDE ERGEBNISSE AUS EINZELVORHABEN	50
2.3	ÖKOLOGIE UND KLIMASCHUTZ	55
2.3.1	TREIBHAUSGAS- UND SCHADSTOFFEMISSIONEN	55
2.3.2	GERÄUSCHEMISSIONEN	70
2.3.3	ZERO EMISSION BETRIEB DIESELHYBRIDBUS – ANTEIL REIN ELEKTRISCHES FAHREN	71
2.4	WIRTSCHAFTLICHKEIT	77
2.5	NUTZERAKZEPTANZ	82
>> 3	ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK	84
>> 4	BERICHTE AUS DEN PROJEKTEN	90
4.1	PRAXISTAUGLICHKEIT UND EINSATZREIFE	90
4.2	ENERGIEEFFIZIENZ/KRAFTSTOFFVERBRAUCH	101
4.3	ÖKOLOGIE UND KLIMASCHUTZ	118
4.4	WIRTSCHAFTLICHKEIT	122
>> 5	ANHANG	124

>> 1 EINFÜHRUNG: ARBEITSGRUPPE INNOVATIVE ANTRIEBE BUS

Im öffentlichen Personennahverkehr (ÖPNV) wählen deutsche Verkehrsunternehmen bei der Fahrzeugauswahl seit Jahrzehnten vorwiegend Busse mit Dieselmotor, der den Stand der Technik darstellt. Infolge steigender Anforderungen hinsichtlich der Luftqualität, der Lärmverminderung und des Klimaschutzes wächst das Interesse an innovativen Busantrieben. Besonders in Metropolen gibt es verstärkte Bestrebungen künftig entsprechend ausgestattete Busse einzusetzen.

Nicht zuletzt durch das „Clean Power for Transport“-Paket der Europäischen Kommission, wird ein Rahmen geschaffen alternative Kraftstoffe und Antriebe im Markt zu etablieren. Mehrere Maßnahmen sollen der Verwirklichung eines ressourceneffizienten und nachhaltigen Verkehrssystems in Europa dienen. Diese beinhalten die Entwicklung einer langfristigen Kraftstoffstrategie, die Harmonisierung technischer Standards gerade im Bereich der Infrastruktur alternativer Kraftstoffe und der entsprechenden Fahrzeuge sowie konkrete Vorgaben zum Ausbau einer flächendeckenden Infrastruktur für alternative Kraftstoffe.

Eine vielversprechende Technologieoption für den Einsatz in Stadtbussen ist die (Teil-) Elektrifizierung des Antriebsstranges mit Speicherung der elektrischen Energie im Fahrzeug (z. B. in Batterien). Wasserstoffbetriebene Brennstoffzellenbusse verfügen ebenfalls über einen elektrischen Antriebsstrang und befinden sich bereits in der Praxiserprobung. Insgesamt blieb jedoch eine breite Einführung von Fahrzeugen mit elektrifiziertem Antriebsstrang bisher aus.

Aktuell werden verschiedene teilelektrische Dieselhybridbusse, Brennstoffzellenbusse und reine Elektrobusse¹ in deutschen Verkehrsunternehmen in der Praxis eingesetzt und dabei im Linieneinsatz erprobt. Diese Projekte werden mit Mitteln des Bundesministeriums für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI), des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB) sowie des Ministeriums für Wirtschaft und Energie (BMWi) gefördert. Sie dienen der nachhaltigen Markteinführungsunterstützung (Hybridbusse) bzw. der Marktvorbereitung dieser innovativen Antriebstechnologien (Elektrobusse).

Die aus den Projekten gewonnenen Ergebnisse und Erfahrungen der geförderten Projekte sind für Anwender, Nutzer, die Fahrzeugindustrie sowie die fördernden politischen Instanzen von wesentlichem Interesse. Sie werden im Rahmen einer gemeinsamen durch BMVI und BMUB geführten Arbeitsgruppe (AG) „Innovative Antriebe für den straßengebundenen ÖPNV“ systematisch erfasst und bewertet. Das Ziel dieser AG ist es, die Integration innovativer Technologien für Stadtbusse in die Fahrzeugflotten der Verkehrsbetriebe zu unterstützen und zu beschleunigen. Die AG führt hierzu die individuellen Begleitforschungsaktivitäten beider Ministerien zu innovativen Antrieben im busbasierten ÖPNV zusammen und setzt diese fort. Dabei werden sowohl in früheren Phasen identifizierte Fragestellungen aufgegriffen als auch aktuelle Themen zum Praxiseinsatz adressiert.

Ein Schwerpunkt der AG ist die Bewertung von:

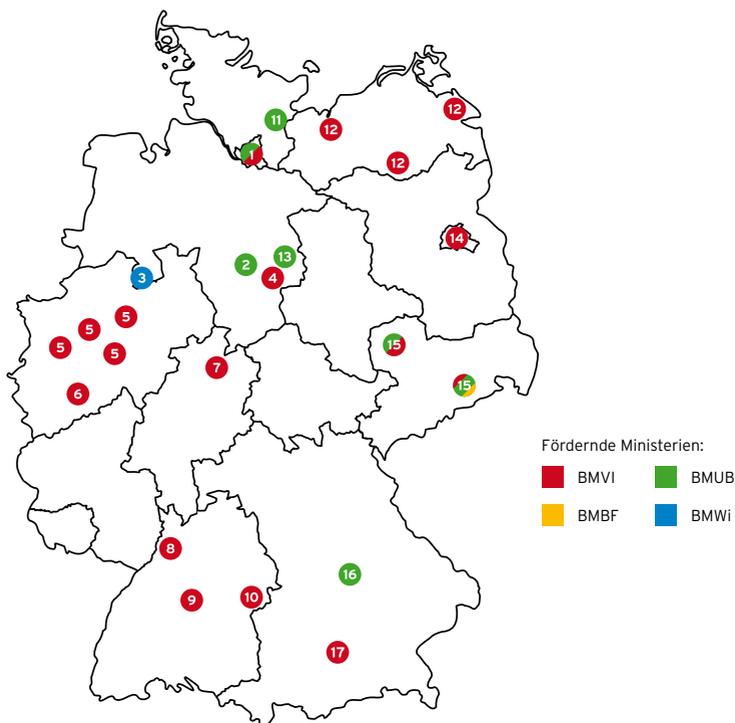
- Optimierungsmaßnahmen an bereits im Einsatz befindlichen innovativen Fahrzeugen,
- neuen technischen Entwicklungen im Bereich Dieselhybrid- und Plug-In Hybridbussen,
- rein elektrischen Antrieben, bei denen unterschiedliche Speicher- und Ladetechnologien zum Einsatz kommen.

Gerade durch die Zusammenführung der Vielzahl der in den Projekten durchgeführten Einzeluntersuchungen, ergibt sich ein breites Spektrum an Ergebnissen für verschiedene Einsatzbedingungen.

Die Arbeitsgruppe setzt sich interdisziplinär zusammen. Neben den fördernden Bundesministerien (BMUB, BMVI, BMWi), beteiligen sich rund 30 Verkehrsbetriebe, Vertreter der Wirtschaft (10 Hersteller und Zulieferer von Linienbussen mit innovativen Effizienztechnologien), der Verband der deutschen Verkehrsunternehmen VDV und Vertreter von Verkehrsverbänden, sowie 11 Organisationen aus Wissenschaft & Beratung. Sie vernetzt die 29 regionalen Einzelprojekte in denen die Praxistauglichkeit und die erzielbaren ökologischen Vorteile von mehr als 200 Dieselhybrid-, Elektro- und Brennstoffzellenbussen dokumentiert und evaluiert werden (siehe Abbildung 1). Die Koordination der AG liegt bei der NOW GmbH und dem VDI/VDE-IT in Zusammenarbeit mit hySOLUTIONS. Die Begleitforschung wird von thinkstep (vormals PE INTERNATIONAL) koordiniert.

¹ Batterie und Brennstoffzelle

- 31 Projekte
34 Betreiber
179 Dieselhybridbusse
97 Solobusse
82 Gelenkbusse
25 Elektrobusse
12 BZ Busse



- G = Gelenk
S = Solo
M = Mini-/Midi
E = Elektro
BZ = Brennstoffzelle
P = Plug-In Hybrid

1 Hybridbusse für Stadtverkehr HH
VB Hamburg-Holstein (10 S)
eBTO
Hamburger Hochbahn (5 G)
ErPaD
Hamburger Hochbahn (5 S, 15 G)
HELD
Hamburger Hochbahn (3 SP, 3 SE)
SaHyb
Jasper (24 S), Süderelbe Bus (10 S)
NaBuZ demo
Hamburger Hochbahn (4 S BZ, 2 G BZ)

2 Hybridbusse in Hannover üstra (10 G)
Emissionsfreier Nahverkehr für Hannover
üstra (3 SE)

3 Hub Osnabrück
Stadtwerke Osnabrück AG (2 ME)

4 EMIL
Braunschweiger Verkehrs-AG (1 SE, 4 GE)

5 EFBEL
Verkehrsverbund Rhein Ruhr
• Krefeld - SWK Mobil (4 G)
• Hagener Straßenbahn (2 S, 2 G)
• Dortmund - TRD Reisen (2 S)
• Bochum - BOGESTRA (5 G)

6 Null Emission
Köln - RVK (2 S BZ, 2 G BZ)

7 FREE
Kassel - KVG AG (1 ME)

8 Primove Mannheim
Mannheim - RNW GmbH (2 SE)

9 HyLine-S
Stuttgart - SSB (5G + 5 GP)
S-Presso
Stuttgart - SSB (4 S BZ)

10 ElvoDrive
Voith AG (1 S)

11 Hybridbusse für einen umweltfreundlichen ÖPNV
Stadtverkehr Lübeck (5 S, 5 G)

12 Inmod Mecklenburg-Vorpommern
GBB / Nahbus (1 ME), BBW (1 S), AVG (1 S)

13 Hybridbus Wolfsburg
Wolfsburger Verkehrsgesellschaft (3 S)

14 E-Bus Berlin
Berliner Verkehrsbetriebe (4 SE)

15 RegioHybrid
Regiobus Mittelsachsen (10 S)
Dresden - DVB (3 S, 3 G)
Leipzig - LVB (3 G)
5 weitere Betreiber (11 S)

SaxHybrid
Dresden - DVB (10 G)
Leipzig - LVB (10 G)
SaxHybrid PLUS
FhG IVI (1 PG)
Elektrobus-Linie 79
SEB-EDDA-Bus (1 SE)
Dresden - DVB (1 SE)
eBus Butterfly
Leipzig - LVB (2 SE)
eBus Skorpion
Leipzig - LVB
gefördert durch Sächsisches Ministerium für Wirtschaft, Arbeit und Verkehr

16 Hybridbusse für Ingolstadt
Stadtbus Ingolstadt (3 S)

17 Hybridbus Erprobung in München
Münchener Verkehrsgesellschaft (1 S, 2 G)

Der vorliegende Bericht stellt eine Fortschreibung des Anfang 2015 veröffentlichten Statusberichts der AG Bus² dar. Als Abschluss zur aktuellen Phase der Begleitforschung im Rahmen der AG informiert er über den gegenwärtigen Stand der Begleitforschungsaktivitäten und über die Entwicklungen beim Einsatz von (teil)elektrifizierten Bussen innerhalb der Projekte. Die Vorstellung der verfügbaren Ergebnisse aus den Begleitforschungsaktivitäten der individuellen Demonstrations- und Forschungsprojekten ist ein weiterer Schwerpunkt dieses Berichts. Dazu sei insbesondere auf den Anhang mit einem Überblick zu den aktuellen (Begleit-)Forschungsaktivitäten in den einzelnen Förderprojekten verwiesen.

>> 1.1 INHALTE DER AG INNOVATIVE ANTRIEBE BUS

Im Mittelpunkt der Arbeiten der AG stehen der Nachweis der Praxistauglichkeit der betrachteten (teil)elektrischen Antriebstechnologien für Nahverkehrsbusse, die Dokumentation des realisierten technischen Standes der Fahrzeuge und der erreichbaren Umwelt- und Klimaschutzzvorteile. Zudem werden auch die künftigen Potenziale der Technologien ausgelotet werden, soweit es aktuell bereits möglich ist. Dies dient der Schaffung eines Marktpulses zur Stärkung der Nachfrage für Hybrid- und rein elektrische Antriebe für den ÖPNV mit Bussen sowie der Unterstützung der Industrie bei der Entwicklung innovativer Antriebskonzepte.

Die Umsetzung erfolgt auf Basis abgestimmter Evaluationskriterien und basiert auf Bewertungskategorien, welche die für eine künftige Marktentwicklung zentralen Themenbereiche abdecken und in Form messbarer Evaluationskriterien konkretisieren. Die fünf wesentlichen Themenbereiche für innovative Antriebstechnologien für Nahverkehrsbusse sind:

- Praxistauglichkeit und Einsatzreife
- Energieeffizienz
- Ökologie und Klimaschutz
- Wirtschaftlichkeit und
- Akzeptanz

Abbildung 1: Projektlandkarte – Übersicht der an der AG Innovative Antriebe Bus teilnehmenden Projekte mit den jeweils eingesetzten Antriebstechnologien

² AG Innovative Antriebe Bus: Statusbericht 2014 – Hybrid- und Elektrobussprojekte in Deutschland. Berlin, 2015.

Bewertungskategorie	Bewertungskriterien
Praxistauglichkeit und Einsatzreife	Täglicher Einsatz
	Verfügbarkeit Fahrzeuge
	Verfügbarkeit Ladeinfrastruktur
	Anpassung Infrastruktur (Werkstatt/Nachladen auf Linie)
Effizienz	Kraftstoffverbrauch aus Lanzeitdatenerfassung
	Einfluss Nebenverbraucher
Ökologie und Klimaschutz	Reduktion CO ₂
	Reduktion NO _x Feinstaub/PM
	Lärm
Wirtschaftlichkeit	Lebenszykluskosten (LCC)
	Break Even Analyse mit Referenztechnologie
Akzeptanz	Fahr-/Werkstattpersonal
	Öffentlichkeitsarbeit, Befragungen

Abbildung 2: Bewertungskategorien und Evaluationskriterien der AG Bus

Anhand von spezifischen Evaluationskriterien werden die technische und die betriebliche Leistungsfähigkeit sowie die ökologischen Effekte der Busse im Vergleich zu konventionellen Dieselnissen bewertet. Für Dieselnissen wird die Wirtschaftlichkeit näher betrachtet. Für rein elektrische Busse wird von einer solchen Betrachtung bewusst abgesehen, da der aktuelle Entwicklungsstand, zurzeit noch nicht als serienreif betrachtet werden kann. Außerdem lässt die gegenwärtig noch eingeschränkte Datenbasis aus der Langzeitdatenerfassung momentan noch keine Ableitung von belastbaren Aussagen zu.

Die Themenbereiche Qualifikation und Akzeptanz (bei Mitarbeitern im Fahrdienst und in den Werkstätten) werden ebenfalls in der AG behandelt. Die Arbeit der AG soll ferner helfen, die Akzeptanz für die neuen Antriebstechnologien im Sinne einer abgestimmten und gezielten Öffentlichkeitsarbeit zu steigern.

>> 1.2 DATENERFASSUNG

Die Datenerfassung und Evaluierung basieren auf drei Säulen (siehe Abbildung 3). Die Basis dabei bildet eine kontinuierliche Langzeitdatenerfassung unter Verwendung der webbasierten SoFi Software von thinkstep. Diese Daten dienen der Bewertung der Betriebserfahrungen und -performance im Sinne einer Fortschrittskontrolle über den Betrachtungszeitraum dieses Berichts (Januar 2013 bis Dezember 2015). Ergänzt werden diese Daten durch dezidierte Messfahrten und -aktivitäten zu Treibstoffverbrauch, Emissionen und Lärm unter spezifisch festgelegten Randbedingungen, z. B. im Rahmen des Projektes EFBEL³. Dieses methodische Vorgehen hat sich aus den Vorgängeraktivitäten bewährt und wird weiter optimiert. Von zentraler Bedeutung ist dabei, dass bei beiden Datenerfassungsansätzen Daten sowohl für die Fahrzeuge mit innovativen Antrieben als auch für Referenzfahrzeuge mit konventionellem Dieselantrieb in repräsentativen Einsatzkontexten gesammelt werden. Die Daten und Ergebnisse der individuellen Begleitforschungsaktivitäten in den F+E Projekten der fördernden Ministerien stellen die dritte Säule dar. Die Evaluationsergebnisse der übergeordneten Begleitforschung werden je Evaluationskriterium (siehe Abbildung 2) mit den verfügbaren Forschungsergebnissen der spezifischen Einzelprojekte themenbezogen ergänzt.



³ EFBEL: „Erweiterte Forschungsbegleitung für den Einsatz von energieeffizienten Linienbussen im Verkehrsverbund Rhein-Ruhr“. Koordiniert durch ika, RWTH Aachen, gefördert vom BMVBS, 2013-16.

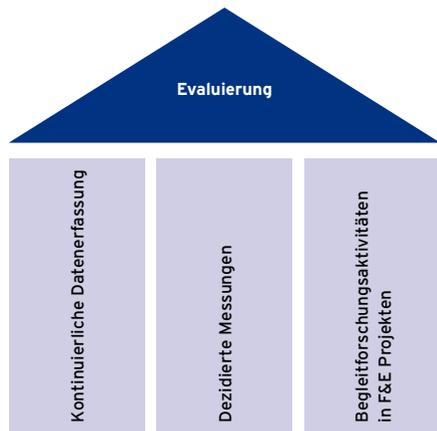


Abbildung 3: Datenbasis der Evaluierung.

>> 1.3 BETRACHTETE TECHNOLOGIEN

Zum Stand Dezember 2015 befinden sich insgesamt 219 Nahverkehrsbusse von 24 Betreibern in der Datenerfassung. Diese teilen sich in 154 Hybrid- und 16 batterieelektrische Busse auf. Weiterhin sind 49 konventionelle Dieselfahrzeuge Teil der Datenerfassung. 25 Solo- und 24 Gelenkfahrzeuge dienen entsprechend des gewählten Ansatzes einer vergleichenden Bewertung als Referenzfahrzeuge für die anderen Antriebstechnologien.

>> 1.3.1 DIESELHYBRID

Fahrzeuge in Langzeitdatenerfassung

Die bewerteten Hybridbusse setzen sich aus Solo- und Gelenkbussen zusammen. Einen Überblick über die Anzahl und Technologien der betrachteten Fahrzeuggrößen gibt Abbildung 4.

Die Solo-Hybridbusse kommen bei insgesamt 15 verschiedenen Betreibern zum Einsatz, während die Gelenkbusse von insgesamt 9 Betreibern eingesetzt werden.

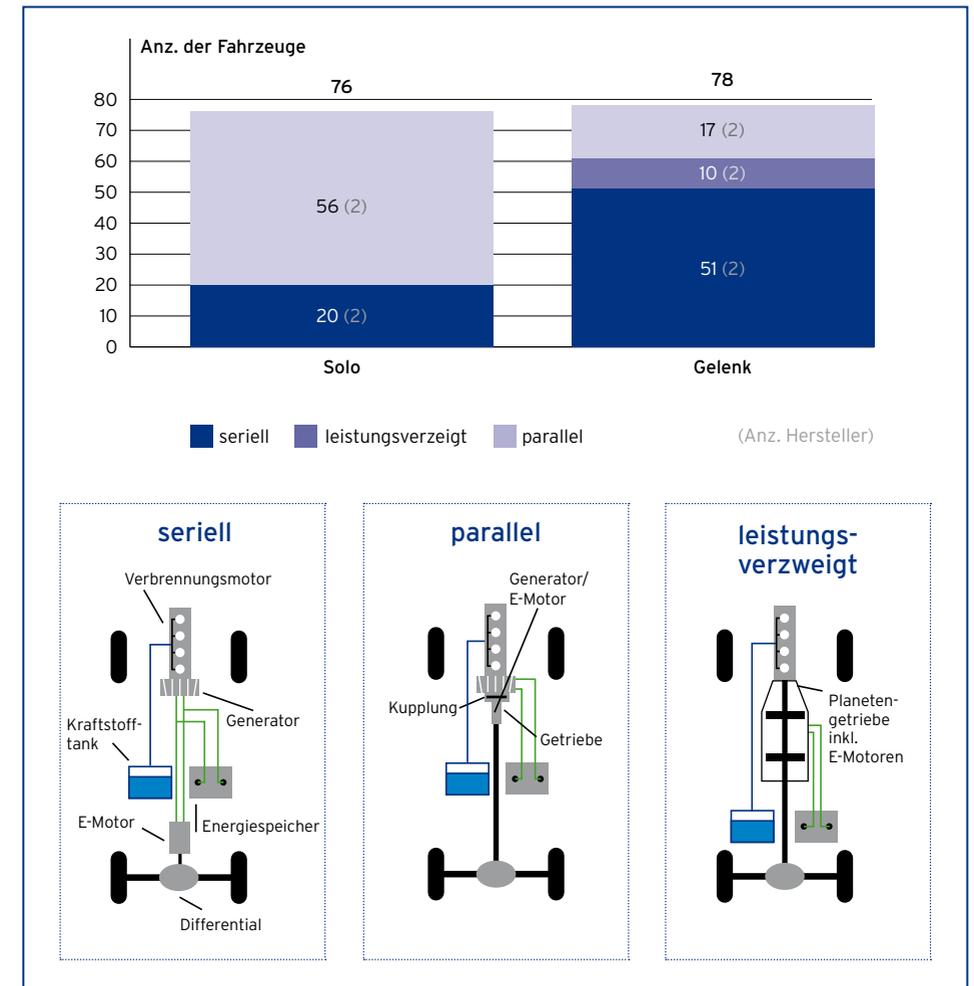
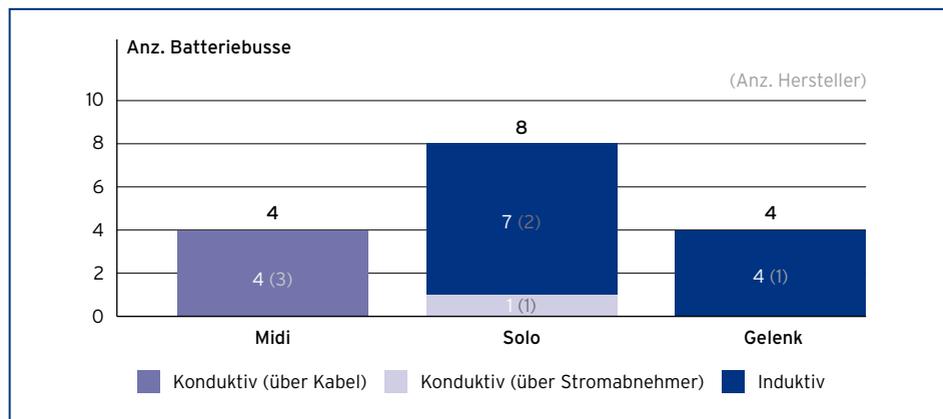


Abbildung 4: Betrachtete Dieselhybridbusse nach Fahrzeuggröße und Antriebstechnologie

>> 1.3.2 BATTERIEBUSSE

In der AG Bus konnten bisher Betriebsdaten von 16 batterieelektrischen Bussen von 7 Betreibern erfasst werden. Bei den Elektrobussen handelt es sich um 4 Batterie-Midibusse mit einer Länge zwischen 6 und 10,5 m, 8 Solo- und 4 Gelenkbatteriebusse (siehe Abbildung 5). Es kommen zwei Ladekonzepte zum Einsatz. Die Midi-Busse werden über Nacht im Betriebs-hof geladen, d.h. sie bestreiten ihren täglichen Linieneinsatz ohne zusätzliches Nachladen der Batterie. Bei den Solo- und Gelenkbusse kommt das zweite Ladekonzept, das sogenannte Gelegenheitsladen zum Einsatz, d.h. die Energiespeicher werden im Linieneinsatz mehrfach auf Strecke nachgeladen.



16 Batteriebusse/3 Plug-In Hybridbusse			
Ladekonzept	Übernachtladung	Gelegenheitsladung	
Ladesystem	Midi (< 12 m)	Solo (12 m)	Gelenk (18 m)
Induktiv Laden		7 Busse*	4 Busse
Konduktiv Laden über Kabel	4 Busse		
Konduktiv Laden über Stromabnehmer		1 Batteriebus* 3 Plug-In Hybridbusse*	

* Die Batteriebusse in Berlin und Dresden sowie in Hamburg die Plug-In Hybridbusse verfügen auch über die Möglichkeit zur konduktiven Übernacht-Ladung über kabelgebundene Steckverbindung auf dem Betriebs-hof bei geringerer Ladeleistung (11-35 kW statt 120 bzw. 200 kW).

Abbildung 5: Betrachtete batterieelektrische und Plug-In Hybridbusse

Bezüglich der Stromübertragung zur Ladung der Energiespeicher kommen zwei Ladesysteme zum Einsatz. Die Energieübertragung erfolgt dabei entweder berührungslos via Induktion oder konduktiv über eine leitungsgebundene Stromzufuhr. Letzteres kann entweder über ein oder mehrere Kabel mit Steckverbindung erfolgen oder über einen Stromabnehmer, z.B. einen Pantograph, der auf dem Dach des Busses oder an der Ladestation angebracht ist.

Des Weiteren sind 3 Plug-In Hybridbusse (12 m) mit konduktiver Nachladung über Stromabnehmer bei der Hamburger Hochbahn im Einsatz.

Ladeinfrastruktur

Ein wesentliches Merkmal der batterieelektrischen Bussysteme ist der Bedarf an Ladeinfrastruktur zum regelmäßigen Aufladen des Batteriespeichers mit elektrischer Energie anstelle des üblichen Tankens von Dieselmotor als Energieträger für Busse mit Dieselmotor. Dabei können wie bereits erwähnt verschiedene Ladekonzepte und -systeme zum Einsatz kommen. Die Auswahl hängt von der jeweiligen Betriebsstrategie bzw. dem täglichen Energiebedarf des eingesetzten Busses ab.

Ein Faktor ist zunächst die Fahrzeuggröße. Midibusse weisen größen- bzw. gewichtsbedingt einen niedrigeren streckenbezogenen Energiebedarf auf als Solo- oder Gelenkbusse. Ein weiterer Faktor ist die Einsatzcharakteristik, z.B. Tagesdistanz, Routentopografie, ggf. zusätzlicher Energiebedarf für Heizung oder Klimatisierung. Je nach Einsatzcharakteristik ergibt sich der zu erwartende Tagesenergiebedarf der entweder bei einem ausreichend dimensionierten Energiespeicher vollständig vom Fahrzeug mitgeführt wird oder durch mehrmaliges Nachladen der Batterie am Tag gedeckt werden muss. Während im ersten Fall ausschließlich auf dem Betriebs-hof über Nacht geladen wird, ist im zweiten Fall Ladeinfrastruktur auf der Strecke vorzusehen, da eine Rückkehr auf den Betriebs-hof zum Nachladen aus zeitlichen Gründen üblicherweise nicht möglich ist. Das Einrücken auf den Betriebs-hof, Laden und wieder Ausrücken auf Linie nimmt in der Regel viel Zeit in Anspruch und ist daher aus betrieblicher Sicht nicht darstellbar. Das Nachladen muss folglich in den Strecken- bzw. Umlaufverlauf örtlich (wo wird geladen) und zeitlich (wann muss wie lange geladen werden) eingeplant werden. Um dieses Gelegenheitsladen zu ermöglichen, ist im jeweils erforderlichen Umfang Ladeinfrastruktur zu installieren, z.B. an Endhaltestellen oder auch Streckenhaltestellen zu installieren. Der Ladestrom kann dabei je nach Ladesystem entweder induktiv oder konduktiv, d.h. berührungslos magnetisch induziert oder leitungsgebunden, übertragen werden. Die nachfolgende Tabelle gibt einen Überblick über die in der AG Bus bisher imple-

mentierten batterieelektrischen Buskonzepte inkl. zugehöriger Ladeinfrastruktur. Weitere Details zur implementierten Ladeinfrastruktur finden sich in Tabelle 8 und im Anhang.

Tabelle 1: Übersicht der zu in AG Bus implementierten batterieelektrischen Buskonzepten inkl. zugehöriger Ladeinfrastruktur

Übersicht der betrachteten batterieelektrischen Buskonzepte		
Ladekonzept Gelegenheitsladen		
Verkehrsbetrieb	Vorhandene/geplante Elektrobuskonzepte	Kurzbeschreibung Betriebs-/Ladestrategie und eingesetzte Ladesysteme
Braunschweiger Verkehrs-GmbH	1 x 12m, 4 x 18m mit induktiver Ladung, elektr. Heizung und Vollklimatisierung	4 Gelenkbussen auf Ringlinie M19 mit induktiver Schnellladung (200kW) auf Linie und im Depot-Ladestrategie. An Pausenhaltestelle wird Batterie in 10 Min. voll geladen, an 2 weiteren Stationen wird Batterie während Haltestellenaufenthalt (ohne Sonderladezeit) nachgeladen. Metrobus-Linie M19 ist ca. 12 km lang, 26 Haltestellen, 10 Minuten-Takt
Berliner Verkehrsbetriebe	4 x 12m mit induktiver Ladung, elektr. Heizung und Vollklimatisierung 1 x 12 m, konduktiv	4 Fahrzeuge auf Linie 204 mit induktiver Schnellladung (200 kW) auf Linie und konduktiver Ladung über Stecker im Depot (30 kW). Je eine ind. Ladestelle an Endhaltestelle Südkreuz und Hertzallee. 4 Ladesäulen im Depot. Linie 204: 6 km, Umlaufdauer ca. 23 min, 18 Haltestellen. Geplant: 1 Bus mit konduktiver Pantografladung und Smart Grid Fähigkeit. Details noch unbekannt.
Rhein-Neckar-Verkehr	2 x 12m mit induktiver Ladung, elektr. Heizung und Vollklimatisierung	2 Batteriebusse auf Linie 63 mit induktiver Schnellladung (200 kW). 6 Ladestationen (beide Endhaltestellen + 4 weitere auf der Strecke) + 1 Ladestelle im Depot. Linie 63: 9,4 km Linienlänge mit 23 Haltestellen und Umlaufdauer von 40 Minuten
Dresdner Verkehrsbetriebe	1 x 12m mit konduktiver Ladung, elektr. Heizung und Fahrerklimateanlage	1 Bus auf Linie 79. Konduktive Schnellladung (200 kW) am Endpunkt mit Über-Dach-Ladekonzept. Stromübertragung über 5-poligen Schunk-Stromabnehmer. Batterie balancieren und Fzg.-vorkonditionierung im Depot mit 35 kW über CCS-Stecker. Linie 79: 5,2 km, Umlauf mit 15 Haltestellen, Linie im 20 min Takt kann von einem Bus bedient werden. Tagesfahrleistung ca. 250-270 km.
Hamburger Hochbahn	3 x 12m Plug-In Hybrid, kondukt. Ladung, Dieselsatzheizung, elektr. Klima 3 x 12m vollelekt., kondukt. Ladung (ab Sommer 2016)	Plug-In auf Linie 109. Konduktive Nachladung auf Strecke an den Endhaltestellen Elektrobusterminal/Hauptbahnhof und Alsterdorf, jeweils 2 Ladepunkte über Schnellladung (120 kW) mit Pantograf; Ladung über Nacht auf dem Busbetriebshof Hummelsbüttel (low-power-charging mit 11 kW); Linien 109: 9,7 km, 23 Haltestellen

Ladekonzept Übernachtladung		
Stadtwerke Osnabrück	1 x 6m, 1 x 9m, konduktive Ladung, Dieselsatzheizung und elektr. Klima 13 x 18 m kondukt. Ladung	2 Batteriebusse mit konduktiver Übernachtladung im Depot über Stecker auf 2 Ladeplätzen; Geplant: 13 Batterie-Gelenkbusse mit konduktiver Schnellladung (Pantograph), 4 Ladeplätze (jeweils 2 an Endhaltestelle) auf Linie 41 (12,7 km, 34 Haltestellen, Umlaufdauer 87 min), im Depot über Stecker auf 13 Ladeplätzen
Kasseler Verkehrs-Gesellschaft	1 x 10,5 m Midi mit konduktiver Ladung	1 Bus mit konduktiver Ladung. Ladung ausschließlich über Nacht im Depot mit 22kW. Einsatz auf 2 Linien: Linie 16 (Freizeit- und Eventlinie), 12,8 km, Tageslaufleistung ca. 105 km; Linie 29, Tageslaufleistung 86,3 km.

>> 1.3.3 WERKSTÄTTEN UND MITARBEITERSCHULUNG

Anpassung Werkstätten

Üblicherweise ist eine Auf- bzw. Umrüstung der Werkstatt für die Wartung und Instandhaltung der Busse mit (teil-)elektrifiziertem Antriebsstrang erforderlich. Ferner sind bedarfsweise Anpassungen des Betriebsablaufs vorzunehmen, da nicht alle Mitarbeiter den gleichen Qualifizierungsgrad für den Umgang mit der Hochvolttechnik eines Busses mit elektrischem Antrieb haben.

Da sich bei fast allen Elektrobussen ein großer Teil der Technik (z. B. Energiespeicher, Wechselrichter) auf dem Fahrzeugdach befindet, ist ein geeigneter Arbeitsstand erforderlich. Dieser kann entweder mobil oder stationär ausgeführt werden.

Teilweise werden von den Verkehrsbetrieben zusätzliche Flächen für die Ersatzteillagerung vorgesehen.

Neben der Beschaffung spezifisch für den elektrischen Antriebsstrang ausgelegte Diagnosegeräte des Herstellers ist geeignete Sicherheitsausrüstung für Arbeiten an HV Komponenten erforderlich (z. B. isoliertes Werkzeug, Sicherheitshandschuhe, Schutzbrille und isoliertes Schuhwerk für die Mitarbeiter, Absperrungen und Warnschilder gegen unbeabsichtigtes Wiedereinschalten der HV Anlage).

Die Umbaudauer inkl. Planung beträgt üblicherweise 1 bis 6 Monate und die Investitionskosten liegen im Bereich von 20 bis 60 k€, abhängig beispielsweise von der Ausführung des Dacharbeitsstandes. Weitere Details zu den erforderlichen Anpassungen in der Werkstatt für den Einsatz von Dieselhybrid- und batterieelektrischen Bussen finden sich in Tabelle 10 und 11 im Anhang.

Mitarbeiterqualifikation für Busse mit teilelektrifiziertem Antriebsstrang

Zur Gewährleistung eines korrekten und sicheren Betriebs der Fahrzeuge mit innovativen Antrieben sind neben den Werkstattmitarbeitern die Fahrer in die Besonderheiten der jeweiligen Antriebstechnologie einzuweisen. Für die Fahrer werden dafür üblicherweise 2 bis 8 h beansprucht.

Bei der Schulung der Werkstattmitarbeiter wird ein modulares Konzept, entsprechend den Vorgaben der DGUV⁴ angewendet. Während Mitarbeiter, die nicht an Hochvoltkomponenten arbeiten, eine 1 bis 5 h Sensibilisierung erhalten, durchlaufen die mit Arbeiten an den HV Komponenten betrauten Mitarbeiter je nach Aufgabenbereich die verschiedenen Stufen der Ausbildung zur Elektrofachkraft (EFKffT) für festgelegte Tätigkeiten (nach DGUV 200-0005/BGI 8686). Basierend auf einer elektrotechnischen Ausbildung folgt auf die Sensibilisierung, ein Grundmodul und ein fahrzeugtypspezifischen Fachmodul. Je nach Vorkenntnis des Mitarbeiters nimmt die Schulung zur EFKffT üblicherweise 40 bis 100 h in Anspruch. Wie viele Mitarbeiter geschult werden hängt entsprechend von der Anzahl der zu betreuenden Fahrzeuge ab.

Weiterführende Information zur Anzahl geschulter Mitarbeiter in den Verkehrsunternehmen mit batterieelektrischen Bussen und zu deren Schulungsdauer können aus Tabelle 12 im Anhang entnommen werden.



>>2 ERGEBNISSE

Die aktuellen Ergebnisse der Begleitforschung werden entlang der in Kapitel 1.1 vorgestellten Evaluationsparameter für die Themenbereiche Praxistauglichkeit und Einsatzreife, Energieeffizienz, Ökologie und Klimaschutz sowie Wirtschaftlichkeit und Nutzerakzeptanz präsentiert. Weiterführende Informationen aus den Einzelvorhaben sind aus Kapitel 4 zu ersehen.

>> 2.1 PRAXISTAUGLICHKEIT UND EINSATZREIFE

>> 2.1.1 LAUFLEISTUNG

22 Projekte liefern im Rahmen der AG Bus entsprechend einem gemeinsam vereinbarten Datenset Betriebsdaten auf überwiegend täglicher Basis. Seit 2013 konnten so Betriebsdaten für bisher 219 Busse mit einer kumulierten Laufleistung von über 22 Millionen Kilometer gesammelt werden (siehe Abbildung 6).

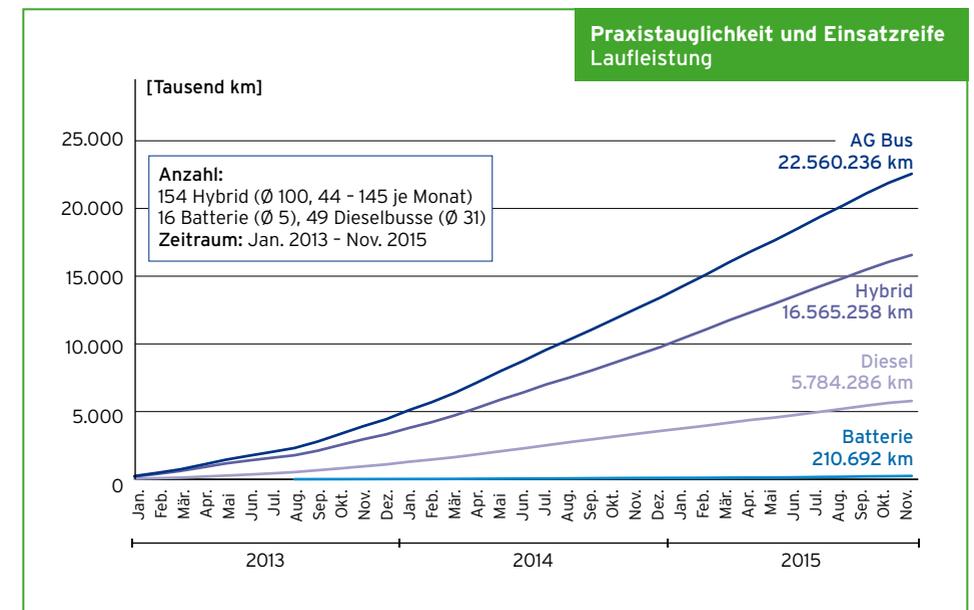


Abbildung 6: Gesamtlaufleistung und Laufleistung nach Antriebstechnologie

Insbesondere für die Hybrid- und Dieselbusse ist eine gute Datengrundlage gegeben. Diese konnte beispielsweise gegenüber dem letzten Statusbericht 2014 durch eine Verdoppelung der Laufleistung bei den Hybrid- und Dieselbussen erweitert werden. In Bezug auf die vorherigen Begleitforschungsaktivitäten in den Jahren 2010-2012 konnte die Datenbasis um den Faktor 6 erweitert werden.

Bei den Batteriebusen beträgt die Laufleistung, bedingt durch die bisher noch deutlich geringere Fahrzeuganzahl sowie durch die spätere Inbetriebnahme und den damit verbundenen späteren Beginn der Datenerfassung, 210.692 km. Aber auch bei diesen Fahrzeugen konnten durch eine Verdreifachung der Laufleistung gegenüber dem Statusbericht 2014 ein wichtiger Schritt zum Aufbau einer validen Datenbasis gemacht und relevante Betriebserfahrungen gesammelt werden. So sind von zumindest 2 Batterie-Midibussen Betriebsdaten für nun mehr als 2 Jahre vorhanden. Für die 12 und 18 m Batteriebusse konnten ebenfalls erste Daten aufgenommen werden. Für drei 12 m Busse sind mittlerweile Betriebsdaten für einen kontinuierlichen Linieneinsatz über mehrere Monate (Datenaufnahme seit Mitte 2015) verfügbar.

Die bisher berücksichtigte Laufleistung der batterieelektrischen Busse veranschaulicht den reduzierten Erfahrungsstand gegenüber beispielsweise Dieselhybridbussen. Die Entwicklungen stehen hier noch am Anfang und die Lernkurven hinsichtlich Zuverlässigkeit, Energieeffizienz, betrieblichem Einsatz etc. werden nun Kilometer für Kilometer „durchfahren“. Dabei sind die mit den Dieselhybridbussen gemachten Erfahrungen in Bezug auf die elektrischen Antriebskomponenten absolut notwendig.

Der betriebliche Einsatz der Hybridbusse und Batteriebusse wird anhand einer detaillierteren Betrachtung der täglichen und monatlichen Fahrleistungen betrachtet.

Hybridbusse

Die in Abbildung 7 dargestellte durchschnittliche tägliche Fahrleistung liegt für Dieselhybridbusse bei 217 km und ist damit vergleichbar mit Dieselreferenzbussen, deren Tageslaufleistung im Mittel bei 225 km liegt. Je nach Verkehrsunternehmen variiert die durchschnittliche Tagesfahrleistung der Hybridbusse zwischen 169 und 289 Kilometern.

Die durchschnittliche monatliche Fahrleistung der Dieselhybridbusse liegt bei etwas über 4.700 km. Dies entspricht einer Steigerung der mittleren Monatsfahrleistung um rund 300 km gegenüber dem Statusbericht 2014 der AG Bus und einer erheblichen Steigerung gegenüber den durchschnittlich ca. 3.300 km, die sich für die Begleitforschung des BMVI im Zeitraum 2010/11 im Mittel ergaben. Damit kann der Dieselhybridtechnologie eine signifikante Verbesserung hinsichtlich ihrer Praxistauglichkeit und Einsatzreife bescheinigt werden.

Die Bandbreite der mittleren monatlichen Laufleistung liegt zwischen 2.100 und 7.850 Kilometern. Darin spiegeln sich die unterschiedlichen Einsatzkontexte bei den Betreibern wider. So kommen beispielsweise im Überlandverkehr eingesetzte Busse aufgrund der höheren mittleren Reisegeschwindigkeit üblicherweise auf entsprechend höhere monatliche Laufleistungen.



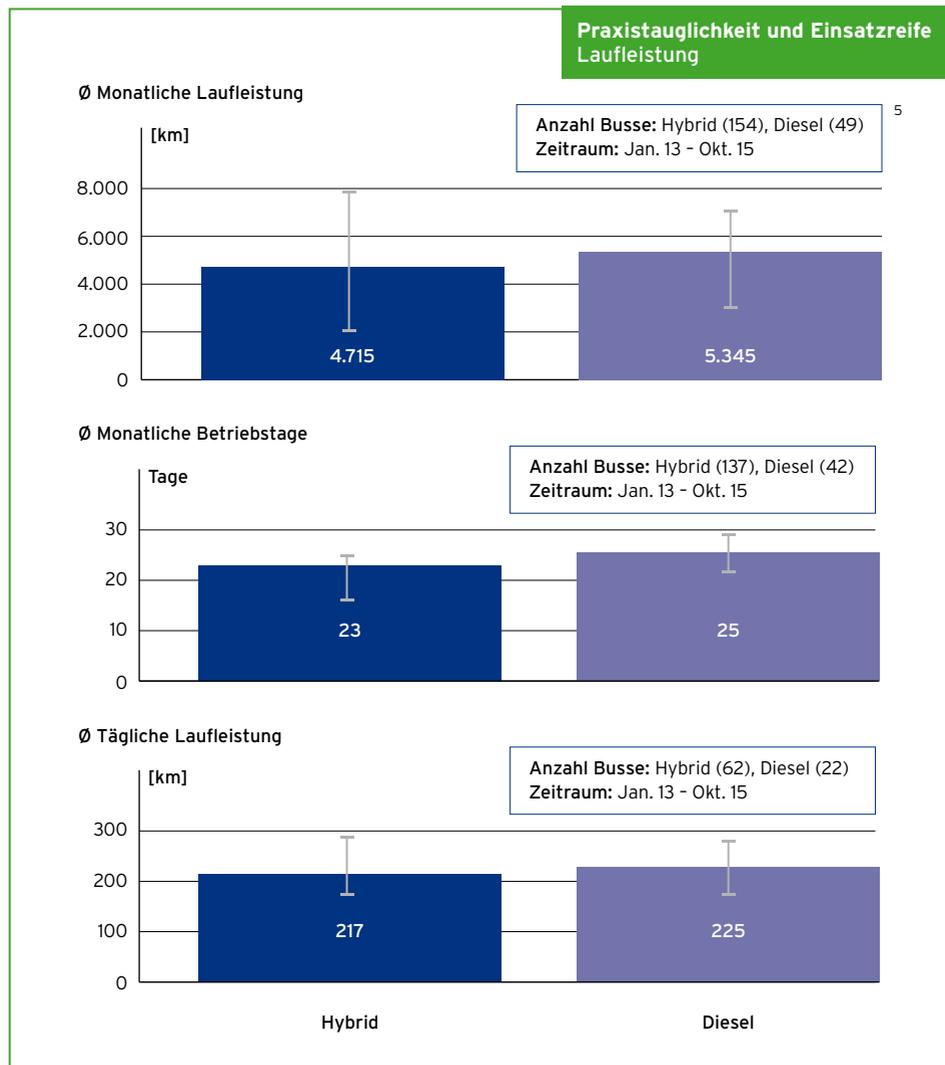


Abbildung 7: Tägliche und monatliche Laufleistung und monatliche Betriebstage Hybrid- vs. Dieselbus

⁵ Überblick Datenbasis: 154 Dieselhybridbusse, Datenerfassungszeitraum: Jan 13 bis Nov 15
 ab Jan 13 LVB, DVB, Hochbahn, SSB MVG (bis Sep 14) • ab Apr 13 Bogestra, Hagen, SWK, TRD • ab Sept 13 Jasper, SBG • ab Okt 13 HVG
 ab Mrz 14: VHH (bis Sep 15), SBI (bis Sep 15) • ab Apr 14 üstra, AVG (bis Okt 14), BBW (bis Okt 14) • ab Aug 14 WVG (bis Sep 15)

Der Dieselbus liegt im Vergleich zum Dieselhybridbus im Monatsmittel mit 5.345 km noch etwas höher. Hier spielt einerseits die Verfügbarkeit (siehe Kapitel 2.1.2) eine Rolle, andererseits zeigt sich auch der Einfluss der Disponierung, d.h. der Planung der Fahrzeuge. Während die Hybridbusse aktuell im Schnitt 6 Tage pro Woche planmäßig eingesetzt werden, werden Dieselbusse üblicherweise 6 bis 7 Tage pro Woche eingesetzt. Dies wird im Vergleich der mittleren Betriebstage der Hybrid- und Dieselbusse (siehe Abbildung 7, Mitte) nochmals deutlich. Die Hybridbusse sind im Schnitt pro Monat ca. zwei Tage weniger im Einsatz.

Während im Einzelfall sicherlich nach Hybridbustyp zu differenzieren ist, zeigt sich im Mittel, dass der Dieselhybridbus hinsichtlich Laufleistung und monatlichen Betriebstagen annähernd vergleichbar zum konventionellen Dieselbus ist.

Batterieelektrische Busse

Betrachtet man die rein elektrischen Batteriebusse, zeigt sich eine geringere mittlere Laufleistung. In der Auswertung wird zwischen Midibussen auf der einen Seite sowie Solo- und Gelenkbussen auf der anderen Seite unterschieden. Diese Unterscheidung bietet sich an, da für jede Gruppe ein anderes Ladekonzept zum Einsatz kommt. Die Midibusse werden ausschließlich über Nacht auf dem Betriebshof geladen, während die Solo- und Gelenkbus ihren Energiebedarf per Gelegenheitsladung auf Strecke decken. Die Solo- und Gelenkbusse laden zwar auch über Nacht auf dem Betriebshof ihren Batteriespeicher, decken ihren Energiebedarf aber mehrheitlich durch Zwischenladungen auf Strecke. Die Zwischenladungen erfolgen üblicherweise mit einer wesentlich höheren Ladeleistung (10 bis 35 kW gegenüber 120 bis 200 kW).

In Abbildung 8 ist zu erkennen, dass die Solo- und Gelenkbusse mit 149 km im Durchschnitt eine höhere tägliche Laufleistung gegenüber den Midibussen (103 km) aufweisen. Dieser Wert korrespondiert gut mit den Reichweitenangaben von 100 bis 150 km für die eingesetzten Batterie-Midibusse. Diese prinzipielle Reichweitenbeschränkung besteht bei Bussen mit Gelegenheitsladung nicht. Hier ist außerdem zu berücksichtigen, dass für die Busse mit Gelegenheitsladung erst Daten für einen relativ kurzen Betriebszeitraum (2 bis 6 Monate, je nach Betreiber) vorliegen und noch nicht alle Busse im regelmäßigen Linieneinsatz sind. Die maximale von den Betreibern im Mittel erzielte tägliche Laufleistung liegt gegenwärtig für die Midibusse bei 180 km und für die Solo- und Gelenkbusse bei 200 km.

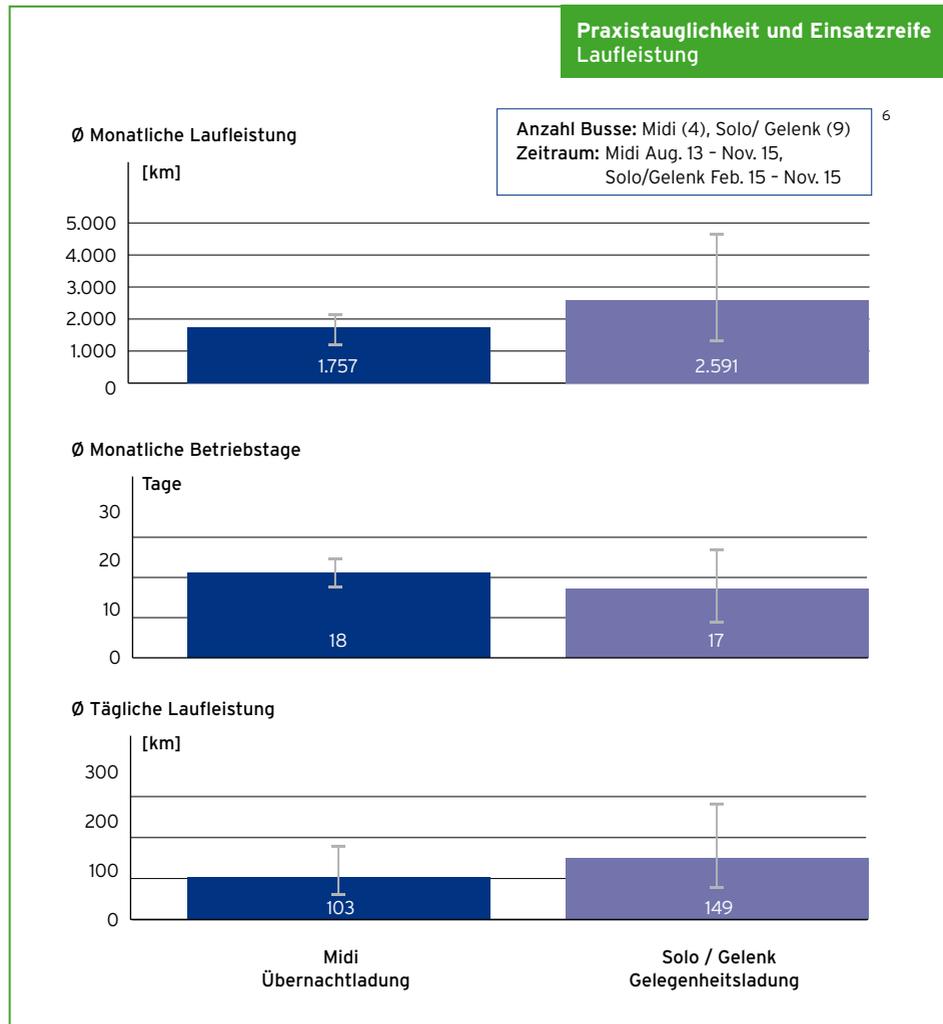


Abbildung 8: Tägliche und monatliche Laufleistung und monatliche Betriebstage batterieelektrische Busse

6 Überblick Datenbasis: 16 Batterieelektrische Busse, Datenerfassungszeitraum: Aug 13 bis Dez 15
 ab Aug 13 SW Osnabrück • ab Apr 14 Nahbus (bis Okt 14) • ab Mai 14 KVG (bis Mrz 15) • ab Feb 15 BSVG • ab Jun 15 DVB •
 ab Jul 15 RNW • ab Sept 15 BVG

Entsprechend den durchschnittlichen Betriebstagen je Monat (18 bzw. 17 Tage) ergibt sich eine monatliche Laufleistung von ca. 1.760 km für die Midibusse und knapp 2.600 km für die Solo- und Gelenkbusse. Direkt vergleichbare Laufleistungsdaten für Dieselbusse als Referenzwerte liegen zurzeit noch nicht vor. Dies liegt zum einen daran, dass die befahrenen Linien ausschließlich von batterieelektrischen Bussen bedient werden, zum anderen Dieselbusse aufgrund der betrieblichen Einsatzplanung nicht auf unmittelbar vergleichbaren Kursen eingesetzt werden.

In der Tendenz zeigt sich, dass Diesel- und Hybridbusse gegenwärtig höhere tägliche und monatliche Laufleistung aufweisen, wobei hier natürlich die Betriebsplanung und die Verfügbarkeit (siehe nächster Abschnitt) eine entscheidende Rolle spielen. So werden die batterieelektrischen Solo- und Gelenkbusse gegenwärtig von den Betreibern mehrheitlich 6 oder auch nur 5 Tage pro Woche disponiert. Als Grund wird hier von den Betreibern konsequenterweise angeführt, dass aufgrund der fehlenden Erfahrungen mit der neuen Technologie, die Einsatzzeiten schrittweise, abhängig von den jeweiligen Betriebserfahrungen, erhöht werden sollen. Dies ermöglicht mit steigendem Reifegrad der Technologie über die Zeit eine Annäherung an die Dieselbusse als Referenztechnologie. Aktuell kommen die Batteriebusse bei zwei der sieben Betreiber schon sieben Tage die Woche zum Einsatz und ein Betreiber erzielt damit bereits eine durchschnittliche monatliche Laufleistung von knapp 4.600 km. Hier wird sich im Verlauf des weiteren Betriebes der batterieelektrischen Busse zeigen, wie sie sich im Praxiseinsatz bewähren und inwieweit die mittleren Laufleistungen gesteigert werden können.

Seit Februar 2015 sind auf der Linie 109 drei 12 m Plug-In Hybridbusse bei der Hochbahn im Einsatz. Ihre mittlere tägliche bzw. monatliche Fahrleistung beträgt 117 bzw. 2.335 km. Sie sind im Schnitt an 20 Betriebstagen pro Monat im Einsatz. Die Kennzahlen ihres Einsatzmusters sind daher mit denen der batterieelektrischen Busse vergleichbar.

>> 2.1.2 VERFÜGBARKEIT

Hybridbusse

Die Verfügbarkeit der Dieselhybridbusse liegt in Bezug auf die eingesetzten Antriebstechnologien und Fahrzeugklassen (12 und 18 m) mittlerweile bei bis zu 92 % (siehe Abbildung 9). Damit wird im Fall der Solobusse mit Parallel-Hybridantrieb eine mit dem konventionellen Dieselbus durchaus vergleichbare Verfügbarkeit, im Bereich 90 bis 97 %, erreicht. Die Verfügbarkeit konnte im Vergleich zum Statusbericht 2014 nochmals verbessert werden. So

gelang es sie, je nach Technologie, um 1 bis 4 % zu steigern und damit der Abstand zum Dieselbus weiter zu verringern. Nichtsdestotrotz weisen die seriellen Solo- und Gelenkhybridbusse ebenso wie die parallelen Gelenkbusse weiterhin Optimierungspotential auf. Die Indikatorbalken in Abbildung 9 vermitteln einen Eindruck der Bandbreiten der monatlich erzielten Verfügbarkeitswerte je Antriebstechnologie.

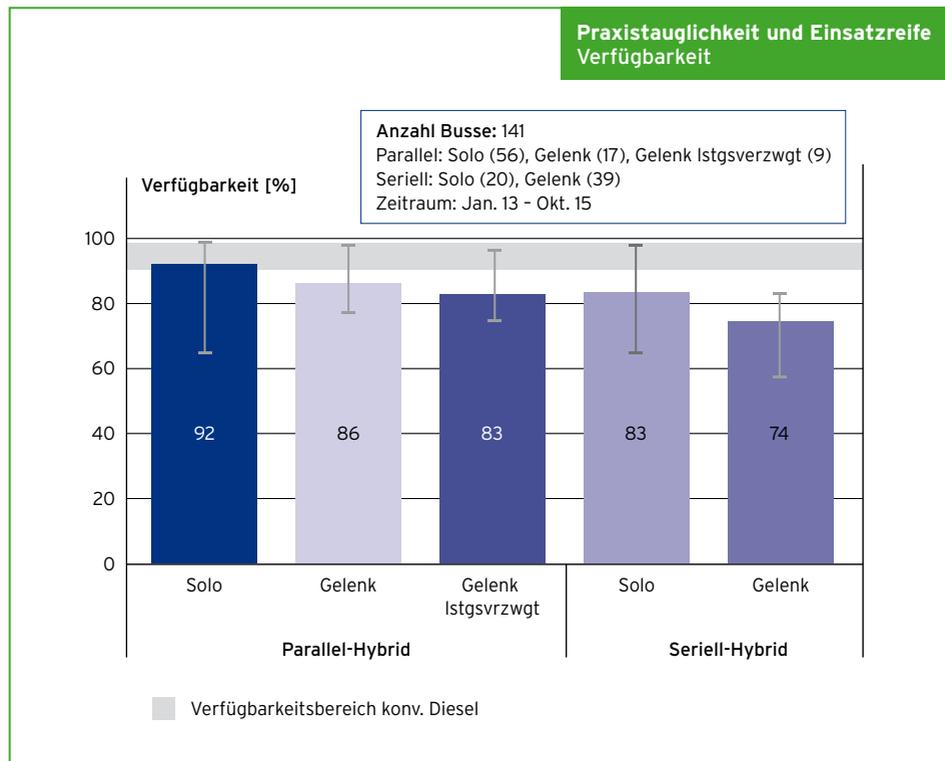


Abbildung 9: Verfügbarkeit nach Fahrzeugklasse und Antriebstechnologie

Damit ergibt sich über alle Dieselhybridbusse hinweg eine mittlere Verfügbarkeit von gegenwärtig 83 % (siehe Abbildung 10). Erwähnenswert ist, dass der Anteil an hybridspezifischen Defekten mit rund 5 % der geplanten Betriebsstunden niedriger ausfällt, als der Anteil der Ausfälle, die nicht dem innovativen Antriebsstrang zuzuordnen sind (sonstiger Defekt, mit 10 %). Damit ist der Anteil der hybridspezifischen Defekte gegenüber dem Statusbericht 2014 um 1 % leicht gesunken. Der zeitliche Anteil „Wartung“ hat sich ebenfalls um 1 % weiter verringert und ist in etwa vergleichbar mit dem Anteil bei konventionellen Dieselbussen.

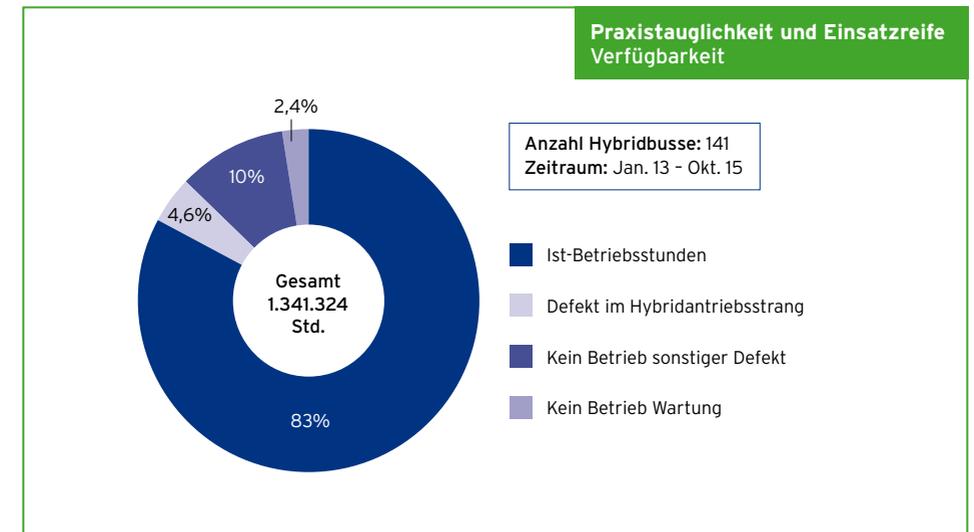


Abbildung 10: Verteilung Betriebsstatus Dieselhybridbusse

Einige der Hybridbusse sind bereits 5 Jahre in Betrieb. Hierzu ergibt sich die Frage ob die Verfügbarkeit der Fahrzeuge, mit steigender Einsatzdauer eventuell abnimmt. Abbildung 11 zeigt die Verfügbarkeit über die Einsatzdauer am Beispiel der beiden Solo-Hybridbustypen.

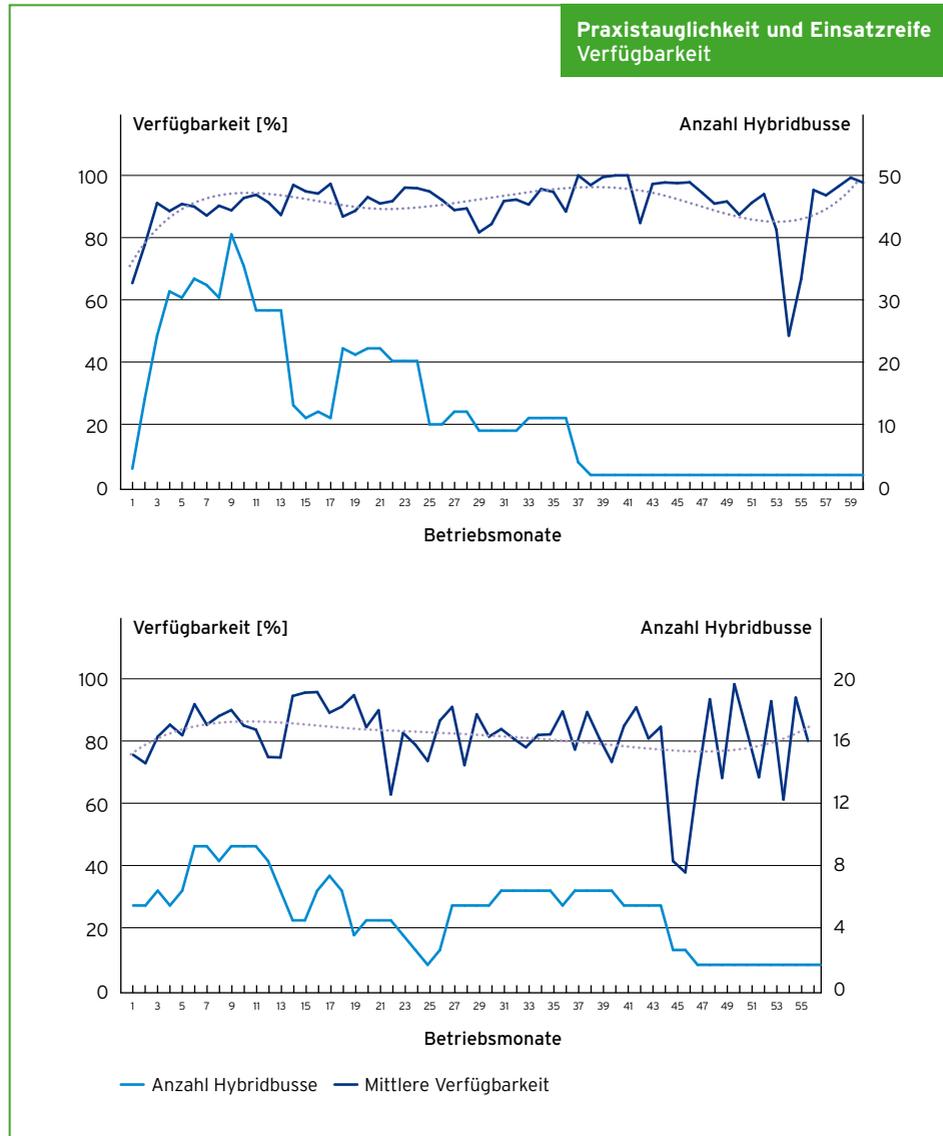


Abbildung 11: Zeitliche Entwicklung Verfügbarkeit über Betriebsmonate für zwei Solo-Hybridbustypen

Hierzu wurden zusätzlich Daten aus den Vorgängerbegleitforschungen von BMVI und BMUB ab 2010 mitausgewertet. Stehen für die Parallel- und seriellen Hybridbusse somit im Schnitt Daten von 12 bzw. 4,5 Fahrzeugen zur Verfügung, ist zu beachten, dass die Datenbasis gerade für die länger laufenden Busse nochmals deutlich kleiner wird. So sind bei den Parallel- bzw. seriellen Hybridbussen ab Monat 37 bzw. Monat 45 gegenwärtig nur Daten für 2 bzw. 1 Fahrzeug(e) verfügbar. Vor diesem Hintergrund ist beim Parallelhybrid über die Betriebsmonate eine stabile Verfügbarkeit gegeben, d.h. es ist gegenwärtig kein ausgeprägter Trend in eine Richtung zu erkennen. Beim Solohybrid deutet sich ggf. eine leichte Abnahme ab Monat 20 bis Monat 44 an. Allerdings beruht die Auswertung bei seriellen Hybriden auf einer geringeren Anzahl von Fahrzeugen (4 bis 5). Ab Monat 48 zeigt sich für die verbliebenen zwei Busse wiederum eine etwas ansteigende Verfügbarkeit, bei einer relativ hohen Schwankungsbreite von 60 bis 100 %.

Die Gelenkbusse verhalten sich ähnlich und zeigen im zeitlichen Verlauf bisher ebenfalls keine Trends auf, die Rückschlüsse auf eine potentiell negative Entwicklung der Dauerhaltbarkeit zulassen würden. Generell ist jedoch davon auszugehen dass mit weiter steigender Einsatzdauer Themen wie Ersatzteilversorgung und -verfügbarkeit voraussichtlich an Bedeutung gewinnen werden.

Batterieelektrische Busse

Lag die Verfügbarkeit der Batteriebusse mit Übernachtladung (4 Midibusse) im Statusbericht 2014 durchschnittlich noch bei 67 %, liegt sie aktuell bei 72 % (siehe Abbildung 12). Betrachtet man nur den Zeitraum seit dem letzten Statusbericht, lag die Verfügbarkeit der Batterie-Midibusse im Durchschnitt bei 86 %. Dies stellt für diese Busse eine klare Verbesserung der Verfügbarkeit dar.

Seit Juli 2015 liegen kontinuierliche Verfügbarkeitsdaten für zumindest 7 Batteriebusse mit Gelegenheitsladung vor. Dabei handelt es sich um Solobusse. Vor dem Hintergrund der geringen Fahrzeuganzahl und betrachteten Zeiträume liefern die aktuell verfügbaren Daten noch keine voll belastbaren Ergebnisse. Gegenwärtig liegt die Verfügbarkeit der Batteriebusse mit Gelegenheitsladung bei ca. 76 %.

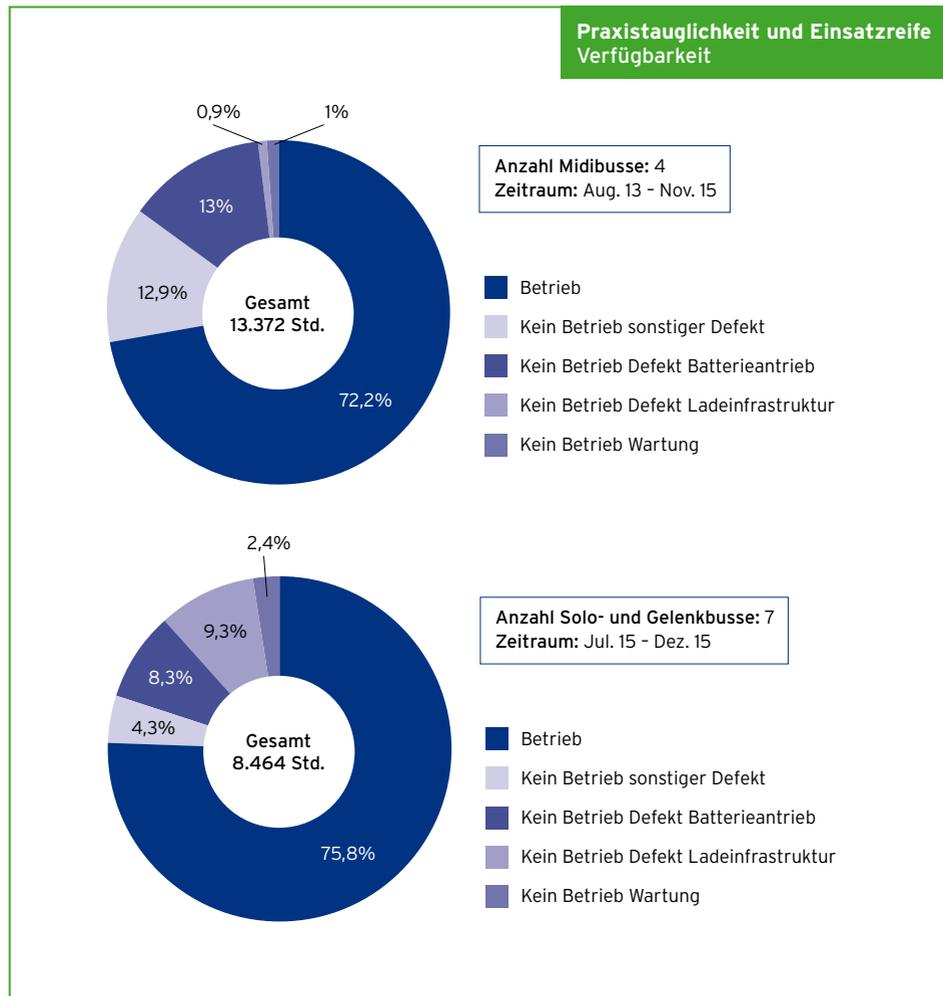


Abbildung 12: Verteilung Betriebsstatus Batteriebusse

Vergleicht man die Aufteilung zwischen den einzelnen Defekt- und Wartungskategorien, fällt auf, dass bei den Bussen mit Übernachtladung Defekte an der Ladeinfrastruktur und die Wartung mit jeweils ca. 1% Ausfallzeit praktisch keine Rolle spielen. Bei den Bussen mit Gelegenheitsladung liegt der Anteil, gerade bei den Ausfallzeiten aufgrund von Defekten in der Ladeinfrastruktur mit 9% deutlich höher. Insgesamt zeigen die Gelegenheitslader eine gleichmäßigere Verteilung zwischen den einzelnen Ausfallkategorien. Hier wird der weitere Einsatz im täglichen Linienbetrieb zeigen, ob sich gegebenenfalls spezifische Ausfallursachen bei den Fahrzeugen und den eingesetzten Ladesystemen herauskristallisieren werden. Hierzu wird auch die weitere Verbreiterung der Datenbasis mit den Daten der übrigen 5 bereits im Einsatz befindlichen Busse beitragen. Deren Verfügbarkeitsdaten werden zurzeit von den Betreibern zusammengestellt.

Bei den Bussen mit Übernachtladung sorgen aufgrund der auch hier niedrigen Fahrzeuganzahl Sondereffekte wie z.B. mehrmonatige Batteriekonditionierung oder mangelnde Ersatzteilverfügbarkeit nach Verkehrsunfall für hohe Anteile der Kategorien ‚Sonstiger Defekt‘ und ‚Wartung‘.

Eine weitere Bewertung der Verfügbarkeitsentwicklung wird ein wesentlicher Inhalt der zukünftigen Aktivitäten der Arbeitsgruppe sein. Gerade vor dem Hintergrund der weiteren Verbreiterung der Datenbasis durch zusätzliche Fahrzeuge und der sich durch den Betrieb einstellenden Lerneffekte sind neue Erkenntnisse zur Praxistauglichkeit und Einsatzreife der batterieelektrischen Busse zu erwarten. Außerdem ist in die Betrachtung der Verfügbarkeit der Ladeinfrastruktur auch eine Analyse der Zuverlässigkeit des Ladevorgangs mit einzubeziehen. Erste Erfahrungen aus einzelnen Projekten zeigen, dass der Anteil der erfolgreichen Ladevorgänge noch nicht auf einem für den kontinuierlichen Linieneinsatz erforderlichen Niveau liegt. So sind in einem konkreten Beispiel bisher mehr als ein Viertel der Ladevorgänge nicht erfolgreich.



>> 2.1.3 ERGÄNZENDE ERGEBNISSE AUS EINZELVORHABEN ZU BATTERIEBUSSEN

Erste Betriebserfahrungen aus den Projekten FREE (Kassel), emil (Braunschweig), SEB EDDA Bus und Elektrobuslinie 79 (beide Dresden)

In Kassel kam auf der 12,8 km langen Linie 16 ein Batterie-Midibus des tschechischen Herstellers SOR zum Einsatz. Zunächst wurde die vom Hersteller angegebene Reichweite von 150 km nicht voll ausgeschöpft. Aufgrund der positiven Erfahrungen im Linieneinsatz wurde der Umlauf auf 18,1 km erhöht und die Tageslaufleistung somit zweifach von 105 km auf 205 km gesteigert. Die auf der Linie 29 erzielte durchschnittliche Tageslaufleistung von 86,3 km war entsprechend des kürzeren Umlaufs (5,8 km) deutlich geringer.

Der Testbetrieb hat gezeigt, dass der Einsatz eines Batteriebusses im Liniennetz der KVG auf topographisch anspruchsvollen Linien (Linie 16, 180 hm) und auf Linien mit hohem Fahrgastaufkommen (Linie 29) technisch möglich ist. Die durchschnittliche Verfügbarkeit liegt bei 85 %. Im Vergleich zu anderen in der Langzeitdatenerfassung befindlichen Batteriebusen ist sie erfreulich hoch, auch wenn sie damit noch unter den Werten vergleichbarer Dieselreferenzfahrzeuge liegt. Probleme im Betrieb ergaben sich weniger aufgrund technischer Defekte des Busses, als vielmehr im Zusammenspiel von Fahrzeug und Ladegerät. Hier kam es wiederholt zu Abbrüchen des Ladevorganges während der Nacht, mit der Konsequenz, dass das Fahrzeug am nächsten Morgen nicht mit ausreichend geladenem Batteriespeicher zur Verfügung stand.

In den 24 Einsatzmonaten hat der Bus ca. 25.000 km zurückgelegt. Die monatliche Laufleistung liegt damit noch deutlich unter den Werten, die im üblichen Linienbetrieb erreicht werden und dokumentiert, dass es sich hier entsprechend der Zielsetzung des Projektes um einen Testbetrieb handelt. Ein betriebliches Problem, das die Relevanz der menschlichen Komponente bei der Einführung und Erprobung neuer Technologien unterstreicht, trat gerade bei Diensten mit einer höheren Tageslaufleistung von bis zu 200 km auf. Hier befürchtete das Fahrpersonal mehrfachen Einsatz aufgrund einer leeren Batterie nicht beenden zu können. Auch wenn dies im Betrieb nicht ein einziges Mal vorkam, zeigt es wie wichtig Akzeptanz für den Erfolg neuer Technologien ist.

Die Problematik einer ggf. nicht ausreichenden Tagesreichweite ergibt sich bei Bussen mit Gelegenheitsladung so nicht. Im Projekt EMIL der Braunschweiger Verkehrs-GmbH wurde auf der Ringlinie M19 die erste Batteriebuslinie mit induktiver Schnellladung umgesetzt. Auf der 12 km langen Linie mit 25 Haltestellen werden täglich über 6.000 Fahrgäste mit derzeit 4 Gelenk-Batteriebusen befördert. Die reguläre Wendezeit am Bahnhof (ca. 12

Min.) reicht aus, um die mit einer bewusst kleinen und damit leichten ausgerüsteten Elektrobusse über das induktive Schnellladesystem vollständig aufzuladen. Die Reichweite spielt somit eine untergeordnete Rolle. Mit dem Ersatz der Dieselbusse auf der Linie M19 wurde demonstriert, dass eine Umstellung der Antriebstechnologie auf Batteriebusse grundsätzlich möglich ist, ohne dabei den Fahrplan, die Linienlänge und die Standzeiten entscheidend zu ändern. Die gute Integrierbarkeit der induktiven Ladetechnologie in das Stadtbild führte in Braunschweig zu einem insgesamt unproblematischen Genehmigungsverfahren.

Weitere Untersuchungen zur Praxistauglichkeit von Batteriebusen wurden im Projekt „SEB - EDDA-Bus“ durchgeführt. Der Fokus des Projektkoordinators Fraunhofer-Institut für Verkehrs- und Infrastruktursysteme (IVI) lag bei der Entwicklung von Kerntechnologien für schnellladefähige Batteriebusse. Während des 6-monatigen Probetriebs auf verschiedenen Linien der Dresdner Verkehrsbetriebe AG wurde eine Verfügbarkeit von 99 % erreicht.

Für den reibungslosen Betrieb von Batteriebusen ist auch die Verfügbarkeit der Ladeinfrastruktur entscheidend. Im Verbundprojekt Elektrobuslinie 79 der TU Dresden zusammen mit den Dresdner Verkehrsbetrieben bereiteten beispielsweise starke Spannungsschwankungen des Gleichstrom-Bahnstromnetzes auf der Eingangsseite größere Probleme. Dadurch kam es zu Ausfällen der Ladestation und dementsprechend zu einer sinkenden Verfügbarkeit. Eine genaue Aufschlüsselung ist der Tabelle 2 zu entnehmen.

[Tabelle 2: Verfügbarkeit Hochstromladegerät Dreyßigplatz](#)

Monat	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov
Verfügbarkeit (%)	88	95	100	99	94	68

Weiterführende Informationen zu den Projekten finden sich in Kapitel 4.1.

Zusammenfassung der Ergebnisse zu Praxistauglichkeit und Einsatzreife: Dieselhybridbusse

- ⇒ Der aktuellen Begleitforschung steht gegenüber früheren Begleitforschungsaktivitäten eine wesentlich umfangreichere Datenbasis zur Verfügung (seit Januar 2013 Betriebsdaten für über 22 Mio. km von 154 Hybrid- und 49 Dieselbussen).
- ⇒ Dieselhybridbusse weisen eine weiter steigende monatliche Laufleistung auf (aktuell ca. 4.700 km/Monat bei durchschnittlich 23 Betriebstagen im Monat vs. 4.400 km/Monat im Statusbericht 2014), Dieselreferenzbusse liegen bei rund 5.300 km mit durchschnittlich 25 Betriebstagen/Monat.
- ⇒ Die Verfügbarkeit der Dieselhybridbusse beträgt je nach Antriebstechnologie und Fahrzeugklasse bis zu 92 %. Die Solo-Parallelhybridbusse erreichen damit bereits den Referenzwert der Dieselbusse (>90 %). Über alle Dieselhybridbusse hinweg entwickelt sich die Verfügbarkeit im Zeitverlauf positiv (Steigerung um 1 bis 4 % je Antriebstechnologie gegenüber Statusbericht 2014) und nähert sich im Mittel mit 83 % dem konventionellen Dieselbus weiter an. Die Ausfallgründe der Hybridbusse liegen weiterhin mehrheitlich im konventionellen Fahrzeugteil (10 % vs. 5 % Hybridantrieb).
- ⇒ Im Hinblick auf die Stabilität der Verfügbarkeit mit steigender Betriebsdauer (teilweise 5 Jahre) zeichnet sich für die einzelnen Hybridbustypen bisher kein Rückgang der Verfügbarkeit ab.

Batteriebusse

- ⇒ Der Aufbau der Datenbasis für die batterieelektrischen Busse konnte weiter vorangetrieben werden (seit Juli 2015 Betriebsdaten für 13 Solo- und Gelenkbusse mit Gelegenheitsladung zusätzlich zu den 4 Batterie-Midibussen mit Übernachtladung).
- ⇒ Die Batteriebusse liegen derzeit, abhängig von der Einsatzplanung (durchschnittlich 18 Einsatztage/Monat (Midi mit Übernachtladung) bzw. 17 (Solo-/Gelenk mit Gelegenheitsladung) bei knapp 1.800 (Midi mit Übernachtladung) und 2.600 km (Solo-/Gelenk mit Gelegenheitsladung) pro Monat.
- ⇒ Die Verfügbarkeit der 4 Batterie-Midibusse hat sich deutlich verbessert. In den 14 Monaten seit dem letzten Statusbericht lag sie bei durchschnittlich 86 %. Damit liegt sie im Mittel seit Beginn der Datenerfassung im August 2013 bei 72 %. Bei den Bussen mit Gelegenheitsladung liegen erste Daten für 7 Busse vor. Die Verfügbarkeit liegt gegenwärtig bei durchschnittlich 76 %.
- ⇒ Die Entwicklung der Verfügbarkeit ist gerade im Fall der Batteriebusse im Hinblick auf die weitere Verbreiterung der Datenbasis durch zusätzliche Fahrzeuge und die sich durch den täglichen Betrieb einstellenden Lerneffekte im weiteren Verlauf der Begleitforschung zu beobachten.

Die Eignung der betrachteten innovativen Antriebskonzepte für den Linieneinsatz konnte insgesamt weiter verbessert werden. Für die Hybridbusse kann sie mittlerweile als weitestgehend gegeben angesehen werden, auch wenn die Busse hinsichtlich Verfügbarkeit je nach Antriebstechnologie noch weiteren Optimierungsbedarf aufweisen. Die gegenwärtig erprobten Batteriebuskonzepte zeigen bei sorgfältiger Planung des Betriebes im Hinblick auf die Reichweite (Übernachtlander) bzw. die Auslegung der Infrastruktur (Gelegenheitslander) eine grundsätzliche Eignung für den Linienbetrieb. Erste Beispiele zeigen vielversprechende Ansätze für die Realisierbarkeit des Betriebes einzelner Linien mit batterieelektrischen Bussen.

>> 2.2 ENERGIEEFFIZIENZ/KRAFTSTOFFVERBRAUCH

Das Potential zur Steigerung der Energieeffizienz und damit der Einsparung von Kraftstoff bzw. Energie ist eine wesentliche Motivation für den Einsatz von (teil)elektrifizierten Antriebstechnologien in Nahverkehrsbussen. Durch die Möglichkeit Bremsenergie durch Rekuperation zumindest teilweise in Form von elektrischer Energie wieder zu gewinnen und durch den Einsatz von elektrifizierten Nebenaggregaten (z. B. Luftpresser, Lenkhilfpumpe, Kompressor für Klimaanlage etc.) ist es möglich die Energieeffizienz im Fahrzeug zu steigern und damit einen Beitrag zur Ressourcenschonung zu leisten.

Entsprechend der aktuellen Datenverfügbarkeit konzentrieren sich die Auswertungen zum Thema Energieeffizienz auf die Dieselhybridbusse, da hier jeweils vergleichbare Daten zum Kraftstoffverbrauch der Dieselreferenzbusse vorliegen.

Bei den Batteriebussen mit Gelegenheitsladung liegen derzeit für einen Betreiber Verbrauchsdaten für Dieselbusse vor, die einen ersten beispielhaften Vergleich zulassen. Für die Batteriebusse mit Übernachtladung (Midibusse) liegen gegenwärtig keine Verbrauchsdaten von Dieselbussen vor. Dafür sind folgende Gründe zu nennen:

- Es kommen keine Dieselbusse auf der gleichen Linie zum Einsatz (z. B. in Osnabrück).
- Die Linie wird zwar auch von Dieselbussen bedient, allerdings bedienen diese noch weitere Linien im selben Umlauf und damit liegen keine sinnvoll vergleichbaren Verbrauchsdaten vor (z. B. in Kassel (KVG) und Nordwestmecklenburg (GGB/Nahbus)).

Gegenüber der Verwendung von Diesel ergeben sich bei der Nutzung von Strom in Stadtbussen grundsätzlich unterschiedliche Charakteristika in Bezug auf den energetischen Wirkungsgrad:

- Strom: hoher Wirkungsgrad im Fahrzeug (>85%), je nach Herstellungsrouten niedriger Wirkungsgrad (<35 %) in der Bereitstellung
- Diesel: hoher Wirkungsgrad in der Bereitstellung (>85 %), niedriger Wirkungsgrad in der Nutzung im Verbrennungsmotor (<35 %)

Somit ist bei einem Systemvergleich nicht nur die Nutzung, d. h. der Verbrauch des jeweiligen Energieträgers, sondern auch seine Bereitstellung („Well-to-Wheel“) mit zu berücksichtigen. Ferner sind bei der Verbrauchsermittlung der Batteriebusse die Ladeverluste mit einzubeziehen. Hier bietet sich folglich eine Bewertung anhand der Primärenergie an, die den Energiebedarf entlang der gesamten Energiewandlungskette berücksichtigt. Dabei kann außerdem der Bedarf an Primärenergie aus nicht erneuerbaren und erneuerbaren Ressourcen unterschieden werden, was gerade im Fall der Batteriebusse bei einer Nutzung von Strom aus regenerativen Quellen relevant ist.

Neben der Betrachtung der Energieeffizienz bieten sich entsprechend den Bewertungskategorien der AG Bus für den Vergleich innovativer Antriebstechnologien alternative Evaluationskriterien wie z. B. aus ökologischer Sicht die Treibhausgas- oder Schadstoffemissionen (siehe Kapitel 2.3) oder mit Blick auf die Wirtschaftlichkeit die Betriebskosten (siehe Kapitel 2.4) an.

>> 2.2.1 LINIENCHARAKTERISTIK UND KLIMATISCHE BEDINGUNGEN

Der Kraftstoff- bzw. Energieverbrauch von Nahverkehrsbussen wird entscheidend von den Einsatzbedingungen bestimmt. Diese sind im Wesentlichen die Liniencharakteristik und die klimatischen Bedingungen. Während diese beiden Einflussfaktoren für die Dieselhybridbusse in Kapitel 2.2.3 auf Energieverbrauch detailliert untersucht werden, soll im Folgenden in knapper Form zunächst ein allgemeiner Überblick über die Einsatzrandbedingungen bei den teilnehmenden Verkehrsbetrieben gegeben werden, da Ergebnisse zum Thema Energieeffizienz immer im Kontext der Einsatzbedingungen zu betrachten sind und so eine bessere Einordnung der Ergebnisse ermöglicht wird.

Liniencharakteristik

Die Routencharakteristik wird zum einen bestimmt durch die Linientopografie, d. h. das Höhenprofil der Linie mit entsprechenden Steigungs- und Gefällestrrecken und zum anderen durch die mittlere Reisegeschwindigkeit, die u. a. vom Haltestellenabstand, Fahrplangvorgaben und dem Verkehrsfluss bzw. der Verkehrsdichte abhängt. Die Einsatzbereiche reichen dabei von nahezu vollständig ebenen Strecken, z. B. in Hannover, bis hin zu topografisch sehr anspruchsvollen Strecken in Hagen oder Stuttgart. In Bezug auf die Durchschnittsgeschwindigkeiten reicht die Bandbreite der linien- bzw. netzbezogenen Durchschnittsgeschwindigkeiten von 14,7 km/h in Osnabrück bis zu 33,5 km/h in Grevesmühlen in Mecklenburg-Vorpommern. Über alle Linien bzw. Liniennetze hinweg liegt die Durchschnittsgeschwindigkeit der Fahrzeuge in der AG Bus bei rund 19 km/h und damit wie auch bei der Mehrheit der mehr als 25 betrachteten Linien bzw. Liniennetze in der von der UITP⁷ entwickelten SORT⁸ Klassifizierung im Bereich von SORT 2 (15 bis 21,4 km/h). Detaillierte Angaben zur Topografie und den Durchschnittsgeschwindigkeiten der einzelnen Linien bzw. Netze, auf denen die Hybrid- und Batteriebusse eingesetzt werden, finden sich im Statusbericht 2014 in Kapitel 2.2.1.

Klimatische Bedingungen

Extreme klimatische Bedingungen mit hohen bzw. niedrigen Umgebungstemperaturen im Sommer bzw. Winter führen im Bus zu einem entsprechenden Heizungs- bzw. Klimatisierungsbedarf, der bei Einsatz einer Zusatzheizung oder Klimaanlage wiederum unmittelbare Auswirkungen auf den Energieverbrauch des Fahrzeuges hat. Gerade im Fall der Batteriebusse, die mit elektrischer Fahrgastraumheizung und -klimatisierung ausgestattet sind, ist dies im Hinblick auf die Reichweite der Fahrzeuge und damit die Sicherstellung des stabilen Linienbetriebs zu allen Jahreszeiten zu berücksichtigen. Während die Winter im Erfassungszeitraum (Januar 2013 bis November 2015) als relativ mild bezeichnet werden können, traten im Sommer 2015, der als drittwärmster Sommer seit Beginn der Wetterdatenaufzeichnung gilt, höhere Temperaturen über einen längeren Zeitraum als sonst üblich auf.

Darüber hinaus hat auch das Fahrpersonal einen signifikanten Einfluss auf den Energieverbrauch eines Busses. Dieser Einfluss konnte aus einsatztechnischen und datenschutzrechtlichen Gründen nicht erhoben werden und bleibt weiteren Untersuchungen vorbehalten.

⁷ Union Internationale des Transports Public

⁸ Standardised On-Road Test cycle

>> 2.2.2 ERZIELTE KRAFTSTOFFEINSPARUNGEN BEIM DIESELHYBRID

Die für die Analyse der erzielten Kraftstoffeinsparungen herangezogenen Hybrid- und Dieselreferenzfahrzeuge in der AG Bus entsprechen ausnahmslos mindestens der Euro V Abgasnorm.

Seit Anfang 2013 konnte eine mittlere Kraftstoffeinsparung von knapp 13% über alle Busse und Einsatzbedingungen hinweg erzielt werden. Im Vergleich zum letzten Statusbericht (Ø 14% Kraftstoffeinsparung) ist dieser Wert weitestgehend stabil geblieben. Bis auf eine Ausnahme wird weiterhin auf allen betrachteten Linien eine Kraftstoffeinsparung von 2 bis 29% erzielt. Auf einer Gelenkbuslinie kommt es aufgrund des dort vom Betreiber forcierten emissionsfreien Betriebs der Hybridbusse zu einem Mehrverbrauch von 3%. Verschiedene Untersuchungen, u.a. auch im Rahmen der AG Bus, haben gezeigt, dass aus energetischer Sicht der emissionsfreie Betrieb der Hybridbusse, sofern die jeweilige Antriebstechnologie den sogenannten „Null-Emissionsmodus“ oder auch ZEV (Zero Emission Vehicle) unterstützt, zwar lokal Schadstoffemissionen vermeidet, aber energetisch nicht effizient ist.

Die deutlichen Verbesserungen gegenüber den im Zeitraum 2010 bis 2012 ermittelten mittleren Kraftstoffverbrauchseinsparungen konnten mit den genannten geringen Abstrichen bestätigt werden. Damals ergab sich auf 7 von 31 untersuchten Linien ein teilweise nicht unerheblicher Mehrverbrauch (>10%). Hauptgründe hierfür waren seinerzeit u.a. eine nicht immer optimale Routenauswahl im Hinblick auf die jeweilig eingesetzte Antriebstechnologie, eine nicht immer vollständige Vergleichbarkeit der Referenzfahrzeuge bezüglich Abgasnorm und Ausstattung (z. B. Klimaanlage), die Tatsache, dass die Hybridbusse aufgrund ihres technologischen Neuheitsgrades noch nicht optimiert waren, z.B. hinsichtlich Energieeffizienz.

Das im letzten Statusbericht für die implementierten Optimierungsmaßnahmen der Hersteller genannte Beispiel eines seriellen Gelenkhybridbusses weist mittlerweile eine Verbesserung des Kraftstoffverbrauchs um 18 Prozentpunkte auf derselben Linie auf (12% Mehrverbrauch in 2010/11 zu nun 6% Einsparung, statt 9% Einsparung im Statusbericht 2014). Dies bestätigt die beobachtete Effizienzverbesserung über die verschiedenen Hybridantriebstechnologien hinweg.

Differenziert nach Antriebstechnologie und Busgröße ergeben sich für die insgesamt 154 betrachteten Dieselhybridbusse die in Abbildung 13 dargestellten mittleren Verbrauchseinsparungen. Sie liegen in einem Bereich von 4 bis 23% und haben sich damit im Vergleich zum letzten Statusbericht um jeweils 1 bis 3% reduziert. Der Indikatorbalken gibt

dabei die Bandbreite der mittleren auf den einzelnen Linien ermittelten Kraftstoffeinsparungen an. Je Busgröße und Antriebstechnologie wurden 6 bis 7 Linien ausgewertet. Der Wert für Gelenkbusse mit Parallel-Hybridantrieb beinhaltet auch Werte für Gelenkbusse mit leistungsverzweigtem Hybridantrieb.

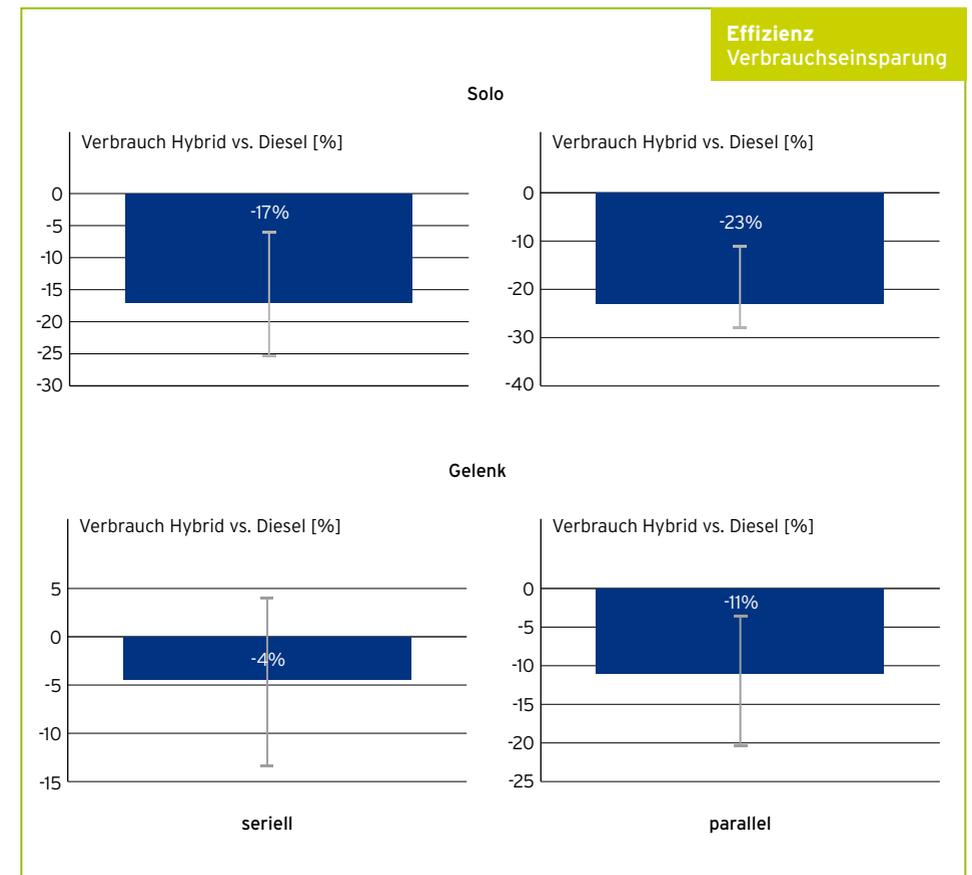


Abbildung 13: Erzielte mittlere Kraftstoffeinsparung nach Antriebstechnologie

Es zeigt sich, dass gerade mit den Solohybridbussen relevante Verbrauchseinsparungen von 20 % und mehr erzielt werden können. Bei den Gelenkbussen mit parallelem Hybridantrieb werden ebenfalls Verbrauchseinsparungen von 18 % und mehr auf einzelnen Linien erzielt. Die Gelenkbusse mit seriellem Hybridantrieb weisen noch weiteres Verbesserungspotential auf, beispielsweise hinsichtlich des Konzeptes für die Fahrgastraumheizung, das gerade bei niedrigen Außentemperaturen zu erhöhten Kraftstoffverbräuchen führt. Detailliertere Untersuchungen zu den Einflussfaktoren auf den Kraftstoffverbrauch der einzelnen Antriebstechnologien und Fahrzeuggrößen folgen im nächsten Kapitel.

>> 2.2.3 EINFLUSS LINIENCHARAKTERISTIK AUF ENERGIEVERBRAUCH

Dieselhybridbusse

Mit dem Ziel, charakteristische Einflusskriterien für die Kraftstoffeffizienz von Hybridbussen herauszuarbeiten, wurden im Rahmen des vom BMUB beauftragten Prüfprogramms „Effizienz-, Kosten- und Einsatzanalyse für den Linienbetrieb von Diesel-Hybridbussen“ Kraftstoffverbrauchsdaten von Diesel- und Hybridbussen aus unterschiedlichen Datenquellen zusammengeführt. Diese Daten stammten aus dem o.g. Programm als Teil der AG Bus, seinen Vorläufern, den Datenbeständen des Bearbeitungskollektivs⁹ und Informationen weiterer Hybridbusbetreiber. Der Schwerpunkt der Untersuchungen lag auf der Eignung unterschiedlicher Hybridisierungskonzepte für bestimmte Liniencharakteristiken, ausgedrückt insbesondere durch die Streckentopografie und die durchschnittliche Reisegeschwindigkeit. Der Fahrereinfluss konnte, wie bereits erwähnt, aus einsatztechnischen und datenschutzrechtlichen Gründen nicht erhoben werden. Zusätzlich wurde der Einfluss von Wetter- und Klimafaktoren untersucht.

Datengrundlage

In die Untersuchungen konnten insgesamt sechs Kombinationen aus Fahrzeuglänge und Hybridsystem einbezogen werden (siehe Tabelle 3).

Tabelle 3: Einbezogene Hybridkonzepte

Art des Hybridantriebs	Solobusse	Gelenkbusse
seriell	mit Supercaps	mit Batterie, mit Supercaps
leistungsverzweigt	N/A	mit Batterie
parallel	mit Batterie	mit Batterie

Hinsichtlich der Datenkonsistenz ergab sich trotz oder auch gerade wegen der umfangreichen Datengrundlage zwar ein teilweise uneinheitliches Bild, die verfügbare Datenbasis lässt aber in der Gesamtschau eine Bestimmung charakteristischer Einflusskriterien auf die Kraftstoffeffizienz von Hybridbussen zu.

Bei den nachfolgend vorgestellten Ergebnissen ist zu berücksichtigen, dass die Messungen aus unterschiedlichen Jahreszeiten stammen und auch nicht immer im gleichen Zeitraum durchgeführt wurden. Während der überwiegende Teil der Daten Ergebnisse aus dem regulären Fahrgastbetrieb (linienrein oder im Netzbetrieb) repräsentieren, sind auch Daten aus sog. Zwillingstests oder aus Testfahrten ohne Fahrgäste berücksichtigt worden. Gemäß dem ausgedehnten Erfassungszeitraum stammen sie von Hybridfahrzeugen unterschiedlicher Generationen mit unterschiedlichen Überarbeitungsständen. Auch entsprechen die Dieselfahrzeuge nicht immer in ausreichendem Maße den Anforderungen an ein Referenzfahrzeug. Das betrifft z. B. die Erfüllung der gleichen Abgasnorm, wie das Hybridfahrzeug oder die Ausstattung mit einer vergleichbaren Heizungs- und Klimatisierungsanlage. Teilweise konnten die Verbrauchsdaten nach reinem Fahrantriebsverbrauch und Verbrauch der Zusatzheizung differenziert werden, sofern ein Zusatztank vorhanden war und die Daten jeweils erfasst wurden. Dies war jedoch nicht immer der Fall. Aus den beschriebenen Umständen ergibt sich eine gewisse Unschärfe für die nachfolgend beschriebenen Ergebnisse. In Summe wird die Datenbasis als valide und geeignet für die Ermittlung der wesentlichen Einflussgrößen auf den Kraftstoffverbrauch von Hybrid- gegenüber Dieselnissen erachtet.

Ergebnisse in Bezug auf die Streckentopografie und Reisegeschwindigkeit

Hinsichtlich der Streckentopografie ergab sich bereits aus vorangegangenen Untersuchungen, dass lange, ununterbrochene Steigungs- und Gefälle Strecken einen großen Einfluss auf den Kraftstoffverbrauch von Hybridbussen bzw. deren Kraftstoffeinsparungen gegenüber konventionellen Dieselnissen haben können. Als Klassifizierungskriterium wurde

⁹ Bestehend aus Fraunhofer IVI, thinkstep, ika –RWTH Aachen und TÜV NORD.

deshalb der Gesamtanteil sogenannter „kritischer Steigungen“ an der Streckenlänge definiert. Kritische Steigungen sind längere Abschnitte mit einem Anstieg von mind. 25 Hm/km und einer Mindestlänge von 700 Metern. Entsprechend Tabelle 4 wurden so in 20 %-Schritten die Topografieklassen T1 (keine kritischen Steigungen) bis T5 (Anteil kritischer Steigungen beträgt 60 % oder mehr) festgelegt, wobei die vorhandenen Daten größtenteils von Strecken aus T1 bis T3 stammten. Als weitere Orientierung innerhalb der Topografieklasse dient die Angabe der darin enthaltenen Streckenanteile mit stärkerer Neigung bzw. zusätzlicher meist kurzer sehr starker Anstiege.

Tabelle 4: Festlegung der Topografieklassen

Topografiebewertung			
Topografieklasse	Gesamtanteil kritischer Steigungen und Gefälle		zusätzliche kritische Steigungen/Gefälle ab 55 Hm/km und mind. 400 m Länge [%] (ist Untermenge von krit. ab 25 Hm/km)
	ab 25 Hm/km und mind. 700 m Länge [%]	ab 35 Hm/km und mind. 700 m Länge [%]	
T 1	0 %	0 %	0 %
T 2	1-19 %	0-19 %	0-2 %
T 3	20-39 %	0-39 %	0-5 %
T 4	40-59 %	0-59 %	0-5 %
T 5	über 60 %	beliebig	0-10 %

Zur weiteren Klassifizierung wurden Geschwindigkeitsklassen in Schritten von 5 km/h eingeführt. Hier lagen die meisten Daten für die Bereiche >15 bis 20 km/h und >20 bis 25 km/h vor (Details können dem Abschlussbericht zum Prüfprogramm¹⁰ entnommen werden).

Wie bereits aus Abbildung 13 ersichtlich, ergeben sich sowohl zwischen den unterschiedlichen Antriebskonzepten als auch den Fahrzeuglängen deutliche Unterschiede in den erzielten Einsparungen. Dies veranschaulichen die Diagramme in Abbildung 14. (Soweit dort nicht anders angegeben, beziehen sich die Vergleiche auf den Gesamtverbrauch von Dieselmotorkraftstoff und Heizöl.)

¹⁰ Der Abschlussbericht zum BMUB Prüfprogramm „Effizienz-, Kosten- und Einsatzanalyse für den Linienbetrieb von Diesel-Hybridbussen“ befindet sich in Vorbereitung und wird zeitnah unter <http://www.erneuerbar-mobil.de/veroeffentlicht>.

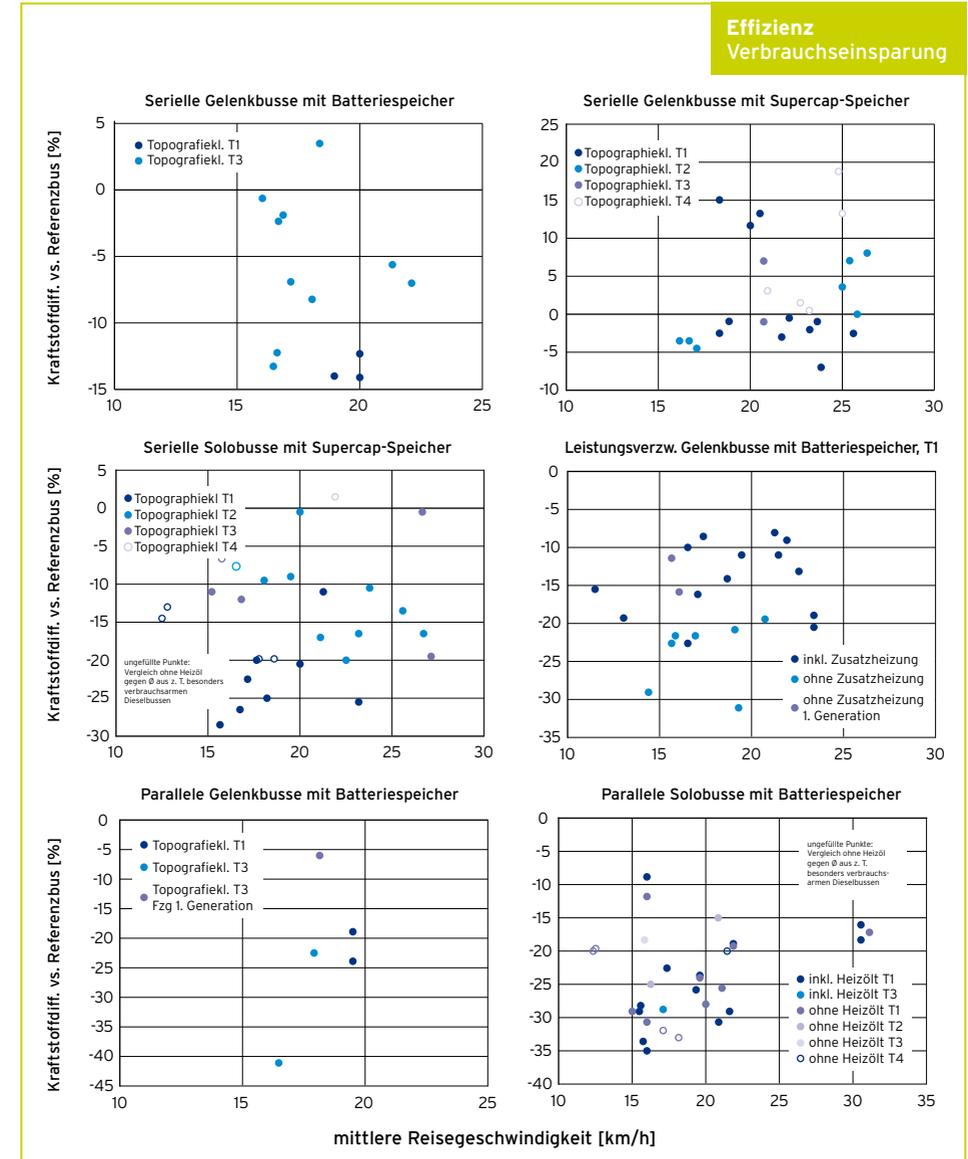


Abbildung 14: Relative Kraftstoffeinsparungen Hybridbussen in Abhängigkeit von der Topografie und der mittleren Reisegeschwindigkeit

Serieller Hybridantrieb

Gelenkhybridbusse mit serielltem Antrieb zeigten bei den vorliegenden Messwerten meist geringe Kraftstoffeinsparungen oder sogar Mehrverbräuche. Die seriellen Hybridgelenkbusse mit Batteriespeicher erzielten dabei höhere Kraftstoffeinsparungen als Fahrzeuge mit Superkondensatorspeicher (sog. Supercaps). Eine Abhängigkeit des Verbrauchs von der mittleren Reisegeschwindigkeit lässt sich anhand der Daten nicht erkennen. Vergleichbar zu den Bussen mit leistungsverzweigtem Hybridantrieb wurden wesentliche Einsparungen meist auf Linien bzw. Linienabschnitten der Topografiekategorie 1 erzielt. Für Gelenkbusse dieser Antriebsart ist es daher von besonderer Bedeutung, sie nur auf geeigneten Linien einzusetzen.

Für Solobusse mit serielltem Hybridantrieb und Superkondensatorspeicher lag die umfassendste und aussagekräftigste Datenbasis vor. Diese Fahrzeuge erzielten auch unter Berücksichtigung des Verbrauchs der Zusatzheizung gute Kraftstoffeinsparungen, wobei die Einsparungen bei den neuesten Fahrzeugen nochmals gesteigert werden konnten, auf knapp 27% in T1 und reichlich 20% in T2. Die Ergebnisse zeigen dabei eine klare Abhängigkeit zwischen den mittleren Kraftstoffeinsparungen und der Topografie sowie der mittleren Reisegeschwindigkeit einer Linie.

Leistungsverzweigter Hybridantrieb mit Batterien

Busse mit leistungsverzweigtem Hybridantrieb und Batterien wurden als erste Hybridbusse in Europa kommerziell eingesetzt. Daher war es möglich, Busse aus zwei Entwicklungsgenerationen in die Untersuchungen einzubeziehen. Die überwiegende Zahl der Messdaten wurde für die Topografiekategorie T1 ermittelt. Für den auswertbaren Geschwindigkeitsbereich deuten die Ergebnisse an, dass die Kraftstoffeinsparungen nicht oder nur unwesentlich von der mittleren Reisegeschwindigkeit abhängen. Für die Topografieklassen T3 und T4 lagen nur einzelne Werte für die erste Fahrzeuggeneration vor. Die Einsparungen lagen bei 13,7% bzw. 11,2%. Fahrzeuge neuester Generation, in deren Auslegung Testergebnisse der Vorgänger einfließen, erzielten linienabhängig Einsparungen für Diesel und Heizöl von knapp über 22%. Überarbeitungen der Bestandsfahrzeuge und sonstige Änderungen können zu einer erheblichen Steigerung des Einsparpotenzials führen.

Paralleler Hybridantrieb mit Batterien

Die Einsparungen, die sowohl mit Solo- als auch Gelenkbussen erzielt wurden, sind erheblich und liegen häufig über der 20%-Marke. Erste Ergebnisse bestätigen dies auch für anspruchsvollere Topografien.

Die Hybridbuskonzepte der einzelnen Hersteller weisen unterschiedliche Ergebnisse bzgl. der Kraftstoffeinsparung gegenüber konventionellen Dieseln Bussen aus. Deutlich wird jedoch, dass Hybridbusse nur dann signifikante Kraftstoffeinsparungen erzielen können, wenn sie auf Linien mit geeigneter Liniencharakteristik eingesetzt werden. Es zeigt sich, dass die Topografie den größten Einfluss auf die Kraftstoffersparnis hat, speziell der Anteil längerer ununterbrochener Steigungs- und Gefälle Strecken mit stärkerer Neigung, sog. kritischer Steigungen. Davon ausgenommen sind die Parallelhybride mit Batterie. Demnach sollten Hybridbusse vorrangig auf Linien mit einem den Topografieklassen T1 und T2 entsprechenden Höhenprofil eingesetzt werden. Parallelhybridbusse mit Batterie können nach derzeitiger Datenlage auch auf topografisch anspruchsvollen Linien eingesetzt werden. Ein Zusammenhang zwischen Kraftstoffeinsparung und mittlerer Reisegeschwindigkeit ist mit Hilfe der Daten belegbar, allerdings ist der Einfluss der Reisegeschwindigkeit geringer als der Einfluss der Topografie zu bewerten.

Wie bereits in Kapitel 2.2.2 dargestellt, zeigen die Untersuchungen bei den älteren Fahrzeuggenerationen bzw. Überarbeitungsständen deutliche Unterschiede zwischen den Fahrzeugglängen auf. Während die seriellen und leistungsverzweigten Gelenkhybridbusse älterer Generation zumeist nur geringe bis mittlere Kraftstoffeinsparungen gegenüber konventionellen Dieseln Bussen auswiesen, sind die Einsparungen durch Solohybridbusse signifikant. Es wäre jedoch falsch, daraus die Schlussfolgerung zu ziehen, dass Hybridantriebe nur für Solobusse geeignet sind. Dies belegen auch Kraftstoffeinsparungen von 18 bis 24%, die aktuell von parallelen und leistungsverzweigten Gelenkhybridbussen auf einzelnen Linien erzielt werden. Es zeigt sich also, dass der Auswahl der für die jeweilige Liniencharakteristik geeigneten Hybridbuskonzepte im Fall der Gelenkhybridbusse noch mehr Bedeutung zukommt. Darüber hinaus spielt im Fall der seriellen Gelenkhybridbusse die Fahrgastraumheizung eine nicht unerhebliche Rolle (siehe Kapitel 2.2.4).

Batteriebusse

Gegenwärtig liegt aufgrund des frühen Stadiums, in dem sich die Technologie mit den gerade erst beginnenden Praxiseinsätzen befindet, noch keine ausreichende Datenbasis vor, die bereits eine umfassendere Analyse des Einflusses der Liniencharakteristik auf den Energieverbrauch von batterieelektrischen Bussen erlauben würde.

Die Betrachtung zumindest eines ersten Beispiels ist auf Basis der Daten aus dem Projekt SEB - EDDA Bus möglich (weitere Details zum Projekt finden sich im Kapitel 4.1). Im Projekt fand ein zweiphasiger Praxistest eines 12 m Batteriebusprototypen mit Dieselsatzheizung auf zwei unterschiedlichen Streckenprofilen in Dresden statt (siehe Abbildung 15). Dabei handelte es sich jeweils um Teilstücke der Linie 61.

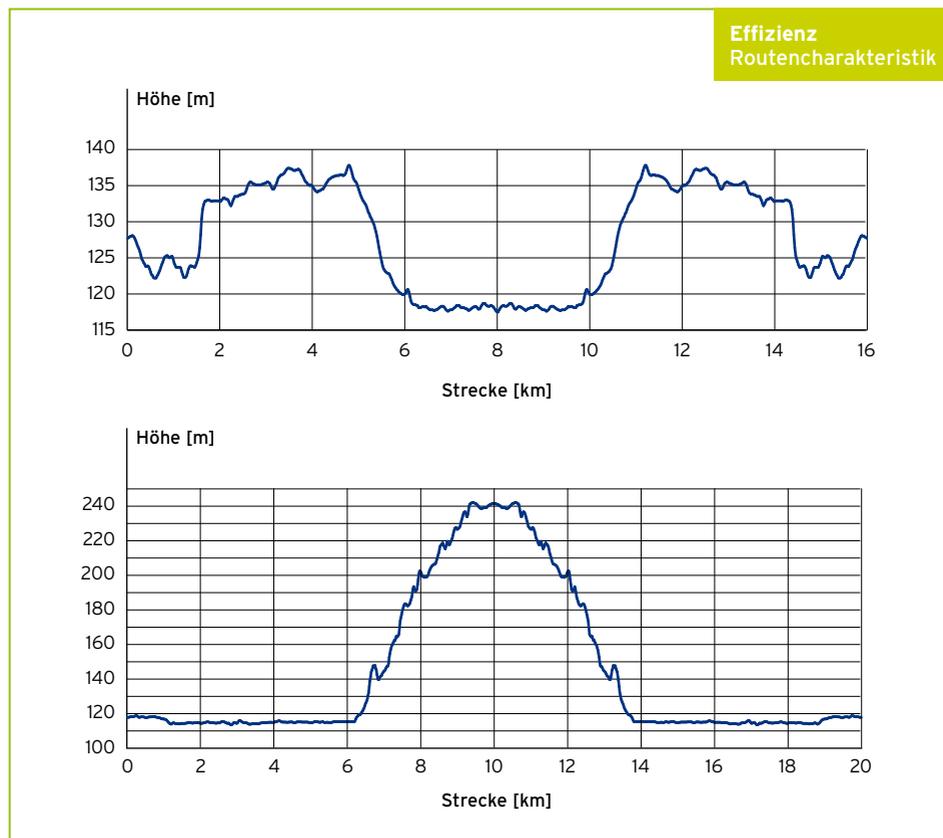


Abbildung 15: Streckenprofile der beiden Praxistests im Projekt SEB - EDDA Bus

Auf dem in der Abbildung oben dargestellten Streckenprofil wurde der Bus als Verstärker im Zeitraum November 2014 bis Januar 2015 eingesetzt und auf dem unteren Streckenprofil von Februar bis April 2015, ebenfalls als Verstärker. Während die maximale Höhendifferenz auf dem oberen Streckenprofil ca. 20 m beträgt, präsentiert sich das untere Streckenprofil mit 120 m Höhenunterschied topografisch anspruchsvoller. Der Energieverbrauch lag auf beiden Streckenprofilen vergleichbar bei 1,2 kWh/km (busseitig ab Stromabnehmer gemessen, Randbedingungen: keine TFT-Bildschirm basierte Fahrgastinformation im Fahrzeug, Kneeling¹¹ nur bei Bedarf, Streckenprofil 1: wenig Fahrgäste im ersten Drittel der Linie, Streckenprofil 2: niedrige Fahrgastzahl auf Teilstück). Die Laufleistung betrug für beide Praxisphasen ca. 9.000 km.

Ob der Energieverbrauch von batterieelektrischen Bussen gegebenenfalls weniger stark vom Linienprofil beeinflusst wird, wie es entsprechend den Ausführungen in diesem Kapitel z. B. bei Dieselhybridbussen der Fall ist, muss noch über weitere Untersuchungen geklärt werden. Zumindest widerlegt die vorliegende Einzelfalluntersuchung eine solche Vermutung nicht.

>> 2.2.4 EINFLUSS KLIMATISCHER BEDINGUNGEN AUF ENERGIEVERBRAUCH

Dieselhybridbusse

Im Statusbericht 2014 wurde bereits der Einfluss von Heizung und Klimatisierung auf den Kraftstoffverbrauch der Hybridbusse untersucht. Am Beispiel des seriellen Solohybridbusses konnte eine relativ gute Korrelation des Kraftstoffverbrauchs mit der mittleren Tagestemperatur, gerade während der wärmeren Sommer- und der kälteren Wintermonate aufgezeigt werden.

Im Rahmen des BMUB-Prüfprogramms wurde der Einfluss der Temperatur auf die relative Kraftstoffeinsparung eingehender untersucht. Hierzu wurden zu den Kraftstoffverbrauchsdaten der Datenbank zusätzlich die monatlichen Temperaturwerte (Durchschnitt, Maxima und Minima) sowie die meteorologischen Kenntage erhoben. Als Datenquelle dienten Klimadaten des Deutschen Wetterdienstes. Aus Abbildung 16 ist am Beispiel der seriellen und leistungsverzweigten Gelenkhybridbusse ersichtlich, dass die höchsten Einsparungen bei Berücksichtigung von Dieselmotorkraftstoff (DK) und ggf. eingesetzten Heizeiseln (HD)

¹¹ Kneeling (von englisch kneeling, knien) bezeichnet das Absenken des Busses auf der Einstiegsseite, um so den Fahrgästen das Einsteigen zu erleichtern.

bei mittleren Temperaturen erzielt werden. Hingegen führen tiefe und hohe Temperaturen zu einer Minderung der Einsparungen. Im Fall der seriellen Gelenkhybridbusse bietet eine Optimierung der gegenwärtig implementierten Konzepte zur Beheizung des Fahrgastraums für den Betrieb während der kälteren Jahreszeit ein nicht unerhebliches Kraftstoffeinsparungspotential.

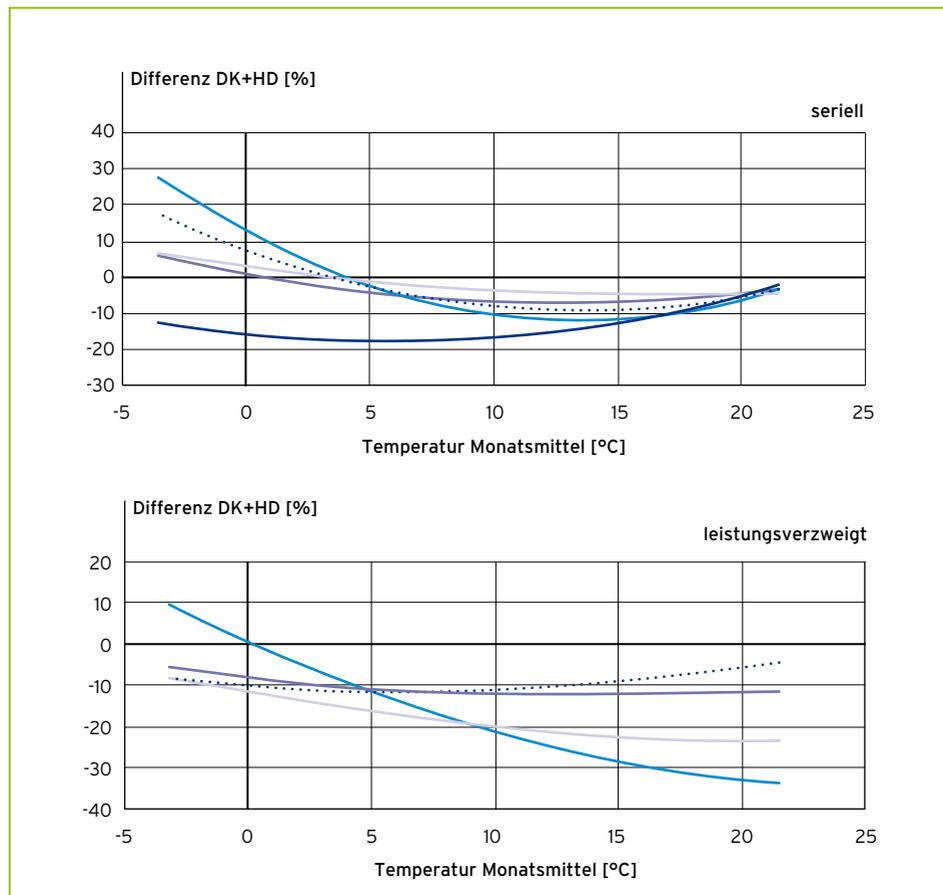


Abbildung 16: Relative Kraftstoffeinsparungen von Hybridbussen in Abhängigkeit von der Außentemperatur am Beispiel serieller und leistungsverzweigter Gelenkhybridbusse

Es ist zu beachten, dass anhand der in Abbildung 16 dargestellten Trendlinien die Temperaturabhängigkeit der erzielten Kraftstoffeinsparung beispielhaft für zwei Antriebstechnologien, unabhängig voneinander veranschaulicht werden soll. Die Antriebsformen sind ausdrücklich nicht miteinander vergleichbar, da die Daten von unterschiedlichen Linien bzw. Netzen stammen.

Batterieelektrische Busse

Batteriebus mit Dieselzusatzheizung

Für die rein elektrischen Batteriebusse stellt gerade die Heizung des Fahrgastraums in den Wintermonaten eine Herausforderung dar. Die im Statusbericht 2014 vorgestellte Analyse des Energieverbrauchs für Fahrtrieb und Fahrgastraumheizung eines Batterie-Midibusses mit Dieselzusatzheizung zeigte beispielhaft, dass aufgrund des Fehlens der Abwärme des nicht mehr vorhandenen Verbrennungsmotors der Energiebedarf der Fahrgastraumheizung¹² in den Wintermonaten in einer vergleichbaren Größenordnung zum Fahrtriebsenergiebedarf liegt. Für den Fall, dass die Heizungsenergie im Sinne eines vollständig emissionsfreien Betriebs über eine elektrische Heizung statt über eine Dieselzusatzheizung bereitgestellt wird, wirkt sich dies unmittelbar auf die Reichweite des Batteriebusses zwischen zwei Ladevorgängen aus. Im Falle eines vergleichbaren Energiebedarfs für Fahrtrieb und Heizung halbiert sich somit die verfügbare Reichweite.

Diese Ergebnisse werden auf Basis der mittlerweile über einen Zeitraum von mehr als 2 Jahren fortgeschriebenen Betriebsdaten bestätigt (siehe Abbildung 17).



¹² Der Energiebedarf der Fahrgastraumheizung wird anhand des verbrauchten Diesels (10 kWh/l) der Zusatzheizung berechnet.

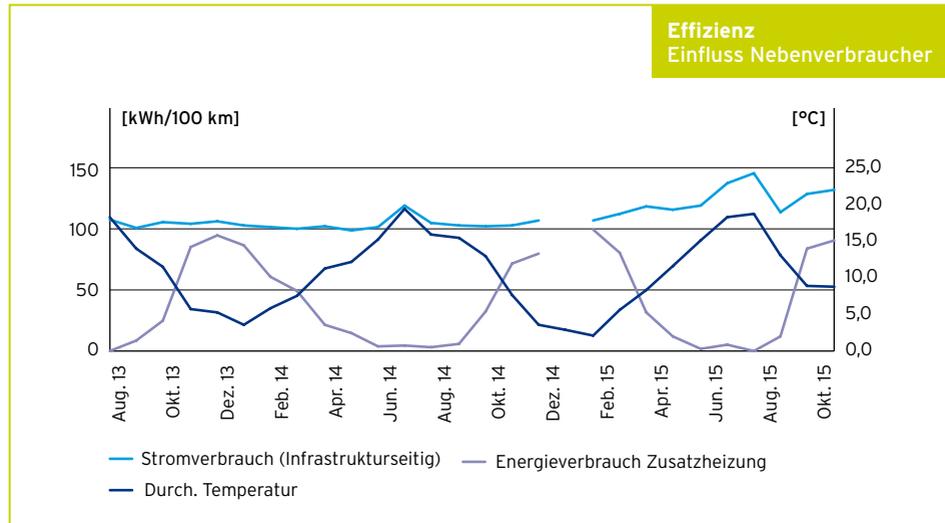


Abbildung 17: Batteriebus mit Dieselsatzheizung - Betrachtung Energieverbrauch für Fahrtrieb und Heizung Fahrgastraum

Während sich ab März 2015 der Energiebedarf des Fahrtriebs aufgrund einer Streckenänderung und der damit einhergehenden Reduktion der Durchschnittsgeschwindigkeit erhöht hat, liegt der im Jahresmittel benötigte Energieverbrauch aktuell bei 37 % und ist damit vergleichbar mit dem Wert (40 %) aus dem letzten Statusbericht. Im Februar 2015 ergab sich bei entsprechend niedrigen Temperaturen ein vergleichbarer Energiebedarf für Fahrtrieb und Heizung. Aufgrund des milden Novembers 2015 liegt der Energiebedarf der Heizung im Vergleich zum Energiebedarf des Antriebs noch etwas niedriger.

Der zusätzliche Energiebedarf der elektrischen Klimaanlage (im Beispiel 32 kW) ist sowohl im Juli 2014 wie auch im Juli und August 2015 zu erkennen. Er fällt aber in beiden Fällen mit einem Mehrverbrauch von knapp 20 % im Vergleich zum Heizenergiebedarf im Winter deutlich geringer aus.

Batteriebusse mit elektrischer Heizung

Erste zusammenhängende Daten für drei Busse mit elektrischer Heizung, die bei zwei Betreibern eingesetzt werden, stehen seit Juni 2015 zur Verfügung. Da die Daten für Fahrtrieb und die Fahrgastraumheizung nicht getrennt erfasst werden, erfolgt die Aus-

wertung auf Basis des Gesamtenergieverbrauchs der Busse. Die Stromverbrauchsdaten (netzseitig, d. h. inkl. aller Ladeverluste¹³) für jeweils 6 Monate ab Juni bzw. Juli 2015 sind in Abbildung 18 gemeinsam mit der mittleren Tagestemperatur dargestellt.

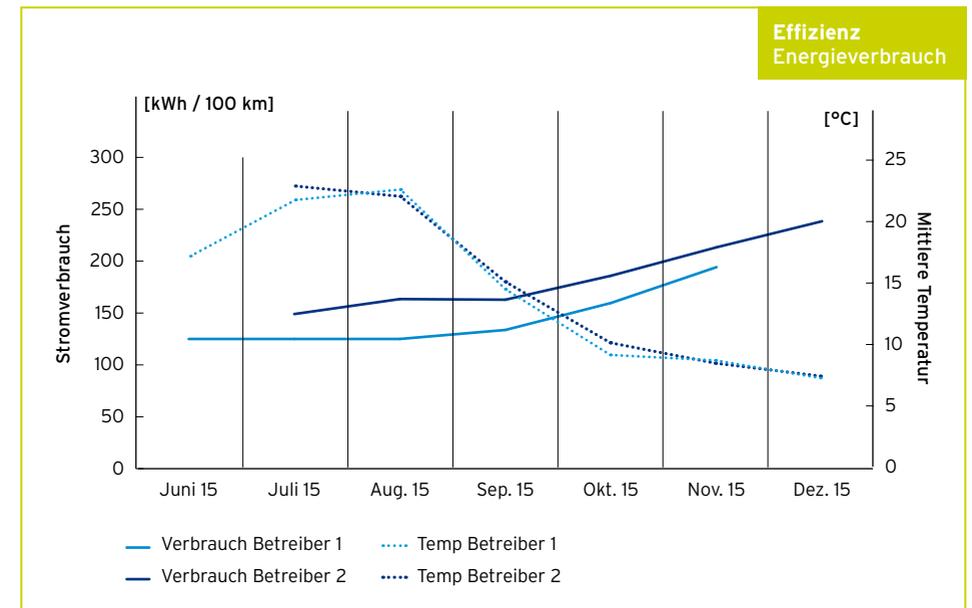


Abbildung 18: Batteriebus mit elektrischer Heizung - Betrachtung Energieverbrauch

Auch wenn der Datenerfassungszeitraum aktuell noch etwas kurz ausfällt, so zeigt sich doch bereits eine erkennbare Korrelation mit der Temperatur. Nachdem die betrachteten Busse alle ohne Vollklimatisierung ausgestattet sind, bleibt der Verbrauch in den Sommermonaten weitestgehend stabil und steigt ab Oktober mit abnehmender Temperatur an. Im Fall von Betreiber 2 steigt der Verbrauch zwischen Juli und Dezember dabei um rund 60 % an. Die mittlere Tagestemperatur lag in den beiden Monaten bei 22,8°C bzw. 7,2°C. Es wird sich im Verlauf des weiteren Betriebs der Busse zeigen, wie sich die Korrelation zwischen Temperatur und Energieverbrauch zukünftig entwickelt. Gerade mit Blick auf

¹³ Eine Betrachtung der Ladeverluste erfolgt in Kapitel 2.2.5.

die milden Temperaturen im November und Dezember 2015 ist abzuwarten, wie stark der zu erwartende Verbrauchsanstieg bei niedrigeren Temperaturen tatsächlich ausfällt. Da die Busse mit Gelegenheitsladung betrieben werden, ergibt sich daraus entweder ein erhöhter Bedarf an Ladeinfrastruktur auf der Strecke, um der kürzeren Reichweite zwischen zwei Nachladevorgängen Rechnung zu tragen oder es ergeben sich bei ausreichend großem Batteriespeicher aufgrund des höheren Energiebedarfs verlängerte Ladezeiten.

Darüber hinaus wird mit der Verfügbarkeit von kontinuierlichen Betriebsdaten für weitere Busse und Bustypen (z. B. mit Vollklimatisierung) die Datenbasis aussagekräftiger.

>> 2.2.5 ERGÄNZENDE ERGEBNISSE AUS EINZELVORHABEN

Dieselhybridbusse

Die Effizienzsteigerung bei Hybridbussen durch Gewichtsreduktion und Energieeinsparungen bei Nebenverbrauchern wird im Projekt „Pilotlinie 64“ von der TU Dresden und den Dresdner Verkehrsbetrieben verfolgt. Es werden verschiedene technische Optimierungen am Heizungs- und Klimasystem implementiert. So kommen beispielsweise eine Wärmepumpenanlage, ein Abgaswärmetauscher, ein Heizstrahler, etc. zum Einsatz. Auf Basis umfangreicher Messdaten aus dem Linienbetrieb wurde ein linienbezogenes Energiemanagementsystem entwickelt, das gegenwärtig getestet und weiter optimiert wird. Durch die implementierten Maßnahmen wird eine Einsparung von mindestens 10 bis 20 % des Heizölverbrauchs des seriellen Gelenkhybridbusses erwartet. Dieser lag bis zu 7-mal höher im Vergleich zu einem konventionellen Dieselbus.

Das Thema Leichtbau wurde mit der Entwicklung einer Hybridfelge, die etwa jeweils zur Hälfte aus Carbon und Aluminium besteht, umgesetzt. Sie ist mit einem Gewicht unter 20 kg mehr als 50 % leichter als eine herkömmliche Stahlfelge. Für den gesamten Bus konnte so eine Gewichtsreduktion von rund 250 kg realisiert werden. Derartige Optimierungsmaßnahmen werden in Zukunft auch für Batteriebusse zunehmend an Bedeutung gewinnen.

Batteriebusse

Erste Betriebserfahrungen aus den Projekten SEB EDDA Bus, Elektrobus-Linie 79, emil

Die in den Einzelprojekten ermittelten Energieverbräuche für Solo-Batteriebusse (1x Dieselsatz-, 2x Elektroheizung) auf 3 unterschiedlichen Linien liegen derzeit für den Solo-bus mit Elektroheizung auf der Linie 79 in Dresden zwischen 1,2 und 1,9 kWh pro Kilometer (Juni bis November 2015, busseitig ab Stromabnehmer gemessen). Der zweite Solo-bus ist in Braunschweig im Schülerverkehr und auf der Linie M19 zeitweise als Verstärker im Einsatz. Für den Zeitraum Februar bis Dezember 2015 weist er inkl. elektrischer Klimatisierung und Heizung einen Verbrauch von 1,4 bis 1,9 kWh/km auf. Hier ist zu beachten, dass der Energieverbrauch ab Netzanschluss gemessen wurde, d. h. dass Ladeverluste berücksichtigt sind. In erster Näherung liegen die busseitigen Verbrauchswerte ca. 10 % niedriger. Beim EDDA-Bus (mit Dieselsatzheizung) wurde im 6 monatigen Probeinsatz in Dresden ein Energieverbrauch von 1,2 kWh/km auf Teilstücken der Linie 61 bzw. 1,3 kWh/km auf der Linie 85 (jeweils busseitig gemessen) ermittelt. Es wird angemerkt, dass die Verbrauchswerte von unterschiedlichen Linien stammen und nicht direkt miteinander vergleichbar sind. Es soll hier lediglich ein Eindruck gegeben werden, welche Verbrauchsbreiten bisher ermittelt wurden. Verbrauchsmessungen bei sehr kalten Bedingungen stehen jedoch noch aus.

Der durchschnittliche Verbrauch der Gelenk-Batteriebusse für den Zeitraum Feb-Dez 2015 im Projekt emil war erwartungsgemäß mit 2,3 bis 3,1 kWh/km (ab Netzanschluss gemessen) höher als bei den Solobussen.

Bei Batteriebussen entscheidet nicht allein der busseitige Energieverbrauch über die Gesamteffizienz des Systems, sondern auch die Effizienz der Stromübertragung. Entsprechende Untersuchungen wurden bzw. werden in mehreren Projekten wie z. B. im Projekt SEB-EDDA, Elektrobus-Linie 79 in Dresden oder den weiteren Projekten mit induktiver Ladetechnologie (emil, Primove Mannheim und E-Bus Berlin) durchgeführt. Die nachfolgende Tabelle gibt einen Überblick über den aktuellen Stand der bisher ermittelten Ladewirkungsgrade bei Batteriebussen je nach Ladetechnologie. Sie liegen bei durchschnittlich 90 bis 95 %. Die Daten stammen je nach Verfügbarkeit einerseits aus dezierten Messkampagnen und/oder wurden auf Basis von Daten aus der Langzeitdatenerfassung berechnet.

Tabelle 5: Übersicht Wirkungsgrade Stromübertragung

Projekt	Ladesystem	Wirkungsgrad	Kommentar
emil, Braunschweig	Induktiv, 200 kW	89,5% (bis zu 91,5%) Ø 90,5%	zwischen Abgang Unterwerk und Batterie; aus Messkampagne aus Langzeitdatenerfassung (8 Monate)
Primove Mannheim	Induktiv, 200 kW	Ø 90,2%	aus Langzeitdatenerfassung (6 Monate)
E-Bus Berlin	Induktiv, 200 kW	Ø 91%	aus Langzeitdatenerfassung (3 Monate)
SEB-EDDA, Dresden	Konduktiv, 250/700 kW	94,7 %	zwischen Netzanschluss und Batterieklemme aus Messkampagne
Elektrobuslinie 79, Dresden	konduktiv, 200kW	ca. 93%	Verlust am Hochstrom-ladegerät ca.7% aus Messkampagne

Darüber hinaus finden noch in weiteren Projekten Untersuchungen zur Energieeffizienz und zum Energiemanagement statt. Hierzu gehören die Projekte HELD, eBus Skorpion, EFBEL und SaxHybridPlus.



Zusammenfassung der Ergebnisse zu Energieeffizienz Dieselhybridbusse

⇒ Über die in der AG Bus betrachteten Hybridbusse hinweg liegt die Kraftstoffeinsparung im Mittel bei ca. 13%. Gerade Solobusse mit parallelem und seriellem Hybridantrieb erreichen dabei Verbrauchseinsparungen von 20% und mehr. Gelenkbusse mit parallelem Hybridantrieb erzielen auf einzelnen Linien ebenfalls Einsparungen von 18% und darüber. Insgesamt werden Einsparungen auf fast allen untersuchten Linien erreicht (1% bis 29%, abhängig von Liniencharakteristik und Bustyp). Eine Ausnahme bildet eine Linie mit teilweise forciertem Null-Emissions (ZEV Betrieb) auf der sich ein Mehrverbrauch ergibt. Damit konnten die im Rahmen des Statusberichts 2014 ermittelten Einsparungen weitestgehend bestätigt werden. Gegenüber den in den ersten ein bis zwei Betriebsjahren beobachteten Verbräuchen (damals wurde auf jeder 5. Linie ein Mehrverbrauch ermittelt) in 2010/11 stellt dies eine wesentliche Verbesserung dar. Hier zeigen die implementierten Optimierungsmaßnahmen Wirkung. Das sind zum einen Anpassungen im Betrieb, z. B. durch die Auswahl geeigneter Linien und zum anderen technische Maßnahmen der Hersteller. So konnte beispielsweise für den gleichen Bustyp auf derselben Linie der ursprünglich ermittelte Kraftstoffmehrverbrauch von 12% auf aktuell 6% Kraftstoffeinsparung verbessert werden.

⇒ Die Analyse der Einflussfaktoren auf den Kraftstoffverbrauch verdeutlicht nochmals, dass Hybridbusse dann signifikante Kraftstoffeinsparungen erzielen können, wenn sie auf geeigneten Linien eingesetzt werden. Als Eignungskriterien ergeben sich auf Basis der vorliegenden Daten die Topografie einer Linie sowie die auf ihr gefahrenen mittleren Reisegeschwindigkeiten. Dabei überwiegt, mit Ausnahme der Parallelhybride mit Batterie, der Einfluss der Topografie. Speziell der Anteil längerer ununterbrochener Steigungs- und Gefällestrecken mit stärkerer Neigung, sog. kritischer Steigungen erweist sich als entscheidend. Demnach ist ein vorteilhafter Einsatz der Hybridbusse auf Linien mit den Topografieklassen T1 bis T2 zu erwarten, d. h. auf Linien ohne bzw. mit einem niedrigen Anteil an längeren und steileren Steigungen. Parallelhybride können nach den bisher verfügbaren Daten auch bei anspruchsvollerer Topografie (T3) gute Einsparungen erzielen. Weiterhin sind tendenziell höhere Einsparungen auf Linien mit niedrigeren durchschnittlichen Reisegeschwindigkeiten erzielbar, wobei hier im Einzelfall zwischen den verschiedenen Antriebstechnologien zu differenzieren ist.

- ⇒ Hinsichtlich des Einflusses der Außentemperatur zeigt sich, dass die höchsten Einsparungen gegenüber konventionellen Dieselbussen bei mittleren Temperaturen erzielt werden. Im Fall der seriellen Gelenkhybridbusse bieten die gegenwärtig implementierten Konzepte zur Beheizung des Fahrgastraums ein nicht unerhebliches Optimierungspotential für weitere Kraftstoffeinsparungen in der kälteren Jahreszeit
- ⇒ Durch die Implementierung einer Wärmepumpe zur Klimatisierung des Fahrgastraums wird eine Reduktion des (erhöhten) Heizenergiebedarfs des seriellen Gelenkhybrid von 10 bis 20 % erwartet
- ⇒ Weiteres Kraftstoffeinsparpotential ergibt sich durch die Gewichtsreduzierung der Fahrzeuge. Am Beispiel einer Leichtbaufelge wird aufgezeigt wie sich durch Anpassung eines Bauteils 250 kg an Fahrzeuggewicht einsparen lassen.

Batteriebusse:

- ⇒ Bisher beobachtete Verbräuche für Solobusse mit elektrischer Fahrgastraumheizung liegen zwischen 1,2 und 2,4 kWh/km. Der Verbrauch wurde netzseitig, d.h. inklusive aller Ladeverluste gemessen. Die Ladeeffizienz (von Netzanschluss bis Batterieeingang) liegt zwischen 90 und 95 %.
- ⇒ Erste Untersuchungen deuten darauf hin, dass die Liniencharakteristik bei Batteriebussen ggf. eine geringere Rolle spielt, hingegen zeigt sich eine klare Korrelation zwischen der Außentemperatur und dem Energieverbrauch. Aufgrund des Wegfalls des Verbrennungsmotors und der damit nicht mehr zur Verfügung stehende Abwärme zur Beheizung des Busses ergibt sich ein zusätzlicher Energiebedarf für die Beheizung des Fahrgastraums bei niedrigen Außentemperaturen.
- ⇒ Beispielhafte Untersuchungen an Bussen mit Dieselzusatzheizung ergaben, dass der Energiebedarf der Zusatzheizung in einer vergleichbaren Größenordnung wie der Energiebedarf des Fahrtriebs liegt bzw. bei entsprechend niedrigen Außentemperaturen auch darüber liegen kann.
- ⇒ Die Nutzung vorhandener Infrastruktur, z.B. von Straßenbahnen, ist aufgrund der auftretenden starken Spannungsschwankungen technisch anspruchsvoll. Bezüglich der kontinuierlichen Gewährleistung einer hohen Verfügbarkeit der Ladeinfrastruktur besteht noch weiterer Entwicklungsbedarf.

>> 2.3 ÖKOLOGIE UND KLIMASCHUTZ

Gerade im Hinblick auf die angestrebten Senkung der CO₂-Emissionen im Verkehrssektor, einer wachsenden Urbanisierung und den geltenden gesetzlichen Regelungen zur Einhaltung der EU-Grenzwerte hinsichtlich Schadstoff- und Lärmbelastungen können innovative, im Betrieb emissionsarme oder -freie Antriebe im busbasierten ÖPNV entsprechende Beiträge leisten.

>> 2.3.1 TREIBHAUSGAS- UND SCHADSTOFFEMISSIONEN

Zunächst werden die Ergebnisse der im Rahmen des EFBEL-Projektes an verschiedenen konventionellen Diesel- und Hybridbustypen durchgeführten Emissionsmessungen vorgestellt. Im Anschluss werden die bisher in der AG Bus vermiedenen Treibhausgasemissionen quantifiziert. Darüber hinaus wird die Vorgehensweise für die lebenszyklusbasierte Umweltbewertung der betrachteten Antriebstechnologien vorgestellt. Hierzu erfolgt ein erster beispielhafter Vergleich eines Batteriebusses mit einem Dieselbus als Referenz.

Detaillierte Messuntersuchungen an Solo- und Gelenkhybridbussen

Auf Basis der von den Dieselhybridbussen erzielten Kraftstoffeinsparung können zunächst die vermiedenen Treibhausgasemissionen ermittelt werden. Ein weiterer relevanter Aspekt der Bewertung des Einsatzes von Dieselhybridbussen ist die Betrachtung der Schadstoffemissionen. Um die tatsächlich im Betrieb erzielbaren Einsparungen an Schadstoffen ermitteln zu können, sind dezidierte Messfahrten unter den realen Einsatzbedingungen auf konkreten Linien erforderlich. Aufgrund der doch sehr unterschiedlichen Einsatzbedingungen, die sich für Stadtbusse im Linieneinsatz ergeben können, ist es wünschenswert, dass die Messungen ein möglichst breites Einsatzspektrum abdecken.

Hierzu werden im Projekt „Erweiterte Forschungsbegleitung für den Einsatz von energieeffizienten Linienbussen im Verkehrsverbund Rhein-Ruhr“ (im Folgenden: EFBEL) Busse mit verschiedenen Antriebskonzepten bezüglich ihrer Abgasemissionen untersucht.

Es wurden zwei parallele Messkampagnen durchgeführt. Die Messungen des Kraftstoffverbrauchs, der Abgasemissionen und der Leistungen im elektrischen Teil des Antriebsstranges sowie der Nebenverbraucher erfolgten auf Testfahrten in den in Abbildung 19 dargestellten Einsatzgebieten. Die Linien wurden zuvor analysiert und so ausgewählt, dass eine große Bandbreite an durchschnittlichen Geschwindigkeiten und Topografieklassen abgedeckt wird. Die Messfahrten erfolgten jeweils in den Sommermonaten der Jahre 2013 bis 2015.

	SORT 1	SORT 2	SORT 3
Topo 1	Krefeld (2 Streckern)	Düsseldorf/Essen	Düsseldorf 3
Topo 2		Essen	
Topo 3	Hagen	Dortmund/Bochum/ Wuppertal	
Topo 4		Ennepetal/Hagen	Dortmund

Abbildung 19: Einsatzgebiete

Die Zusammensetzung des Abgases wurde mit Hilfe eines portablen Emissionsmesssystems erfasst.

Im Folgenden werden Teilergebnisse der Messungen der regulierten Abgasemissionen vorgestellt. Aus den verfügbaren Messdaten werden die Ergebnisse der Fahrten mit vier unterschiedlichen Solobussen ausgewählt und mit dem Durchschnitt zweier Referenzfahrzeuge verglichen.

Über alle Einsatzgebiete hinweg betrachtet, ergeben sich deutliche Vorteile der Hybridfahrzeuge gegenüber den konventionellen Referenzfahrzeugen, wie in Abbildung 20 dargestellt. Die CO₂-Emissionen, die direkt mit dem Kraftstoffverbrauch der Fahrzeuge korrespondieren, verringern sich um 13 bis 28 %. Vergleicht man das konventionelle Fahrzeug, welches nach Euro VI zertifiziert worden ist und die Referenzen, die nach dem schwächeren Euro V/EEV-Standard zugelassen sind, so zeigt sich eine geringe Einsparung. Die strengere Abgasgesetzgebung wirkt sich hier nicht negativ auf die Effizienz aus. Betrachtet man jedoch die Parallel-Hybridfahrzeuge, die sowohl mit Euro V/EEV als auch mit Euro VI-Zulassung vermessen worden sind, so zeigt sich ein etwas höherer Verbrauch, der sich durch die Anpassungen der Betriebsstrategie sowie des Abgasnachbehandlungssystems zur Erreichung der strengeren Grenzwerte erklären lässt.

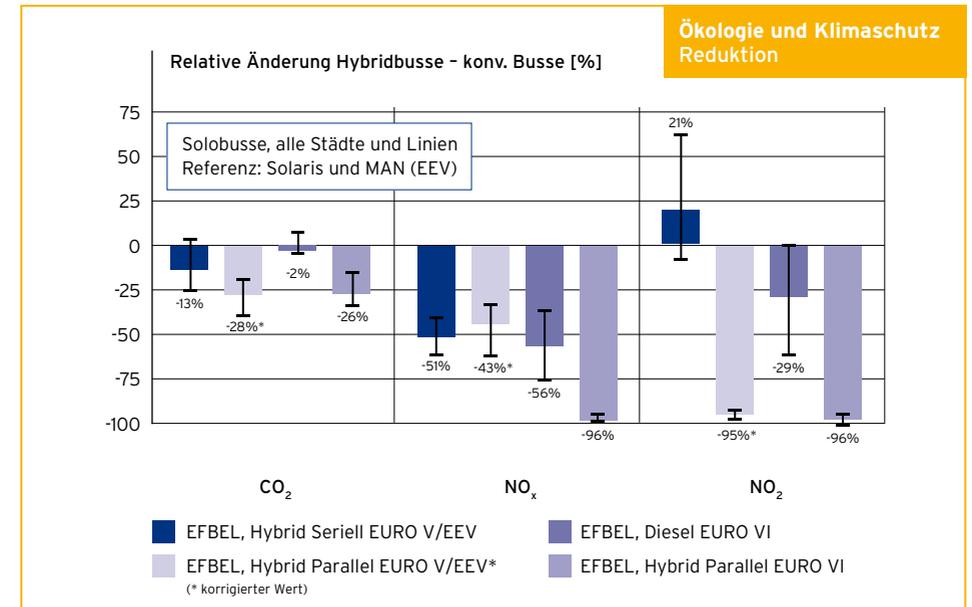


Abbildung 20: Relative Änderungen der Schadstoffemissionen; Solobusse, alle Einsatzgebiete

Betrachtet man die Emissionen der Stickoxide, so lässt sich eine deutliche Reduzierung dieser Luftschadstoffe bei allen betrachteten Fahrzeugen beobachten. Hervorzuheben ist das Verhalten der Hybridfahrzeuge nach Euro V/EEV, die im Vergleich zu den Euro V/EEV Referenzfahrzeugen ca. 40 bis 50 % weniger Stickoxide emittieren, obwohl sie nach derselben Abgasnorm zertifiziert sind. Der intermittierende Betrieb des Verbrennungsmotors sowie die Auslegung der Abgasnachbehandlungssysteme bewirken hier eine Verbesserung des Emissionsverhaltens. Die relativen Abweichungen der Stickstoffdioxide spiegeln die unterschiedlichen Ansätze der Antriebskonzepte sowie der Abgasnachbehandlung wider. Der serielle Hybrid verwendet in der Hauptsache Abgasrückführung zur Minimierung der Stickoxide, die die gesamten NO_x-Emissionen reduziert, aber bei den NO₂-Emissionen weniger effektiv wirkt. Die Parallel-Hybridfahrzeuge nutzen SCR-Katalysatoren mit Harnstoffeinspritzung, die zu einer deutlich stärkeren Reduktion der Stickstoffdioxide im Stande ist. Zu beachten ist jedoch, dass die absoluten NO₂-Emissionen extrem gering sind, so dass selbst kleine Änderungen zu massiven relativen Abweichun-

gen führen. Im Vergleich zu den Euro V/EEV Dieselreferenzfahrzeugen weist der Euro VI Hybrid eine Reduktion von 96% auf. Gegenüber dem Euro VI Dieselfahrzeug weist der Euro VI Hybrid damit eine bemerkenswerte Reduktion von 91% auf. Es soll hier nicht unerwähnt bleiben, dass weitere Messungen an dem in Abbildung 20 dargestellten konventionell betriebenen Euro VI Fahrzeug auch deutlich höhere NO_x -Konvertierungsraten, d.h. niedrigere NO_x -Emissionen, ergeben haben als in der Grafik gezeigt. Aufgrund fehlender Vergleichbarkeit sind diese Ergebnisse hier allerdings nicht dargestellt.

Trägt man die Emissionen als klassierte Werte über den Fahrzeuggeschwindigkeiten auf, wie es in Abbildung 21 dargestellt ist, so lassen sich Aussagen darüber treffen, in welchen Geschwindigkeitsbereichen vorrangig Emissionen erzeugt werden. Gepaart mit den Informationen über den hauptsächlichen Einsatzkontext von Stadtbussen, der sehr niedrige Geschwindigkeiten aufweist, können die unterschiedlichen Antriebskonzepte in der städtischen Fahrumgebung bewertet werden.

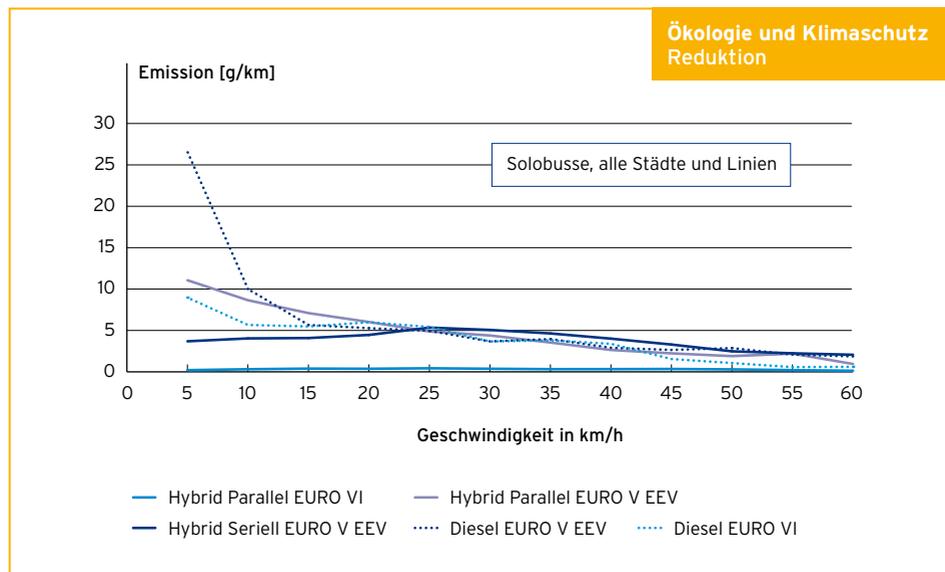


Abbildung 21: NO_x -Emission klassiert über Geschwindigkeit; Solobusse, alle Einsatzgebiete

Beispielhaft sind die NO_x -Emissionen der bereits oben besprochenen Fahrzeuge dargestellt. Typisch für konventionelle Fahrzeuge (Diesel Euro V/EEV und Euro VI) ist ein starker Anstieg der Emissionen in niedrigen Geschwindigkeitsbereichen. Hier befindet sich der Verbrennungsmotor im ungünstigen Teillastbereich. Bei den Hybridfahrzeugen ist dieser Effekt deutlich weniger ausgeprägt bzw. überhaupt nicht vorhanden. Der elektrische Teil des Antriebes wird dazu genutzt, das Fahrzeug bei niedrigen Geschwindigkeiten emissionsfrei bzw. -arm fortzubewegen. Der nach EURO VI zertifizierte Parallel-Hybrid verbindet diesen Effekt mit einer deutlich erweiterten Abgasnachbehandlung, die die Stickoxid-Emissionen bis zur Nachweisgrenze verringert.

Die weiteren Ergebnisse aus EFBEL zu den Geräuschemissionen und zum rein elektrischen Fahren finden sich in den Kapiteln 2.3.2 und 2.3.3.

Langzeitdatenerfassung Dieselhybridbusse

Entsprechend den seit Anfang 2013 in der AG Bus ermittelten Laufleistungen und den dabei erzielten Verbrauchersparungen wurden durch den ein bis dreijährigen Betrieb der 154 Hybridbusse rund 1 Mio. l Diesel eingespart bzw. eine Klimaschutzwirkung von ca. 3.000 t vermiedenen Treibhausgasen (in CO_2 Äquivalenten) erzielt (siehe Abbildung 22). Dies entspricht in etwa den Treibhausgasemissionen, die ein konventioneller Solobus bei einem Verbrauch von 40 l/100 km auf einer Strecke von ca. 2,6 Mio. km bzw. 64 Umrundungen des Erdballs verursacht. Über ihren gesamten Lebenszyklus (üblicherweise 12 Jahre) werden die betrachteten Busse voraussichtlich ca. 19.000 t Treibhausgase bzw. 6,6 Mio. Liter Diesel Kraftstoff einsparen.



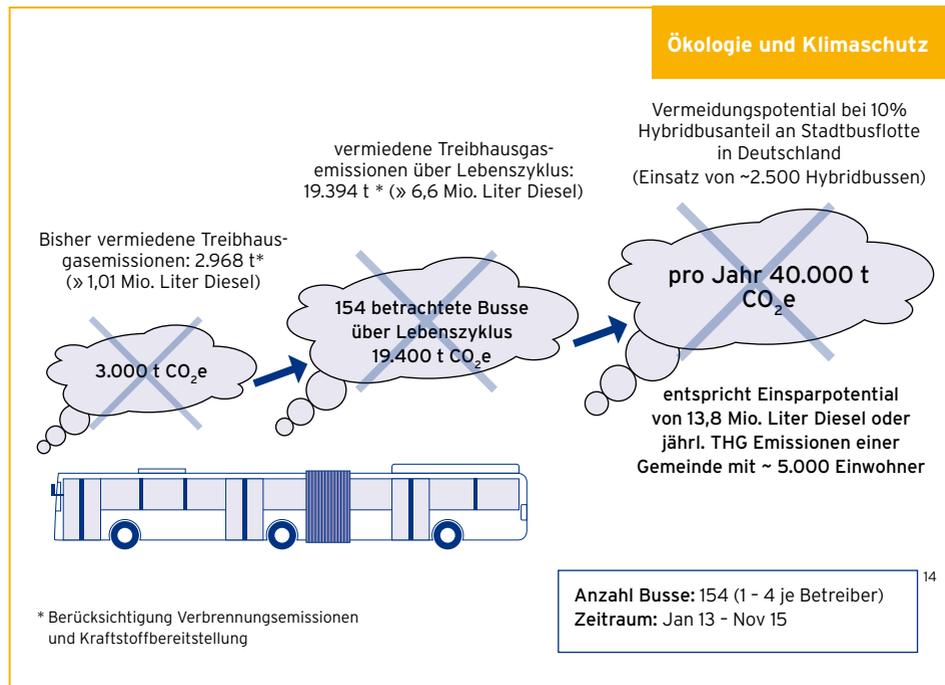


Abbildung 22: Treibhausgase – bisher in der AG Bus erzielte Einsparungen und Einsparpotential



14 ab Jan 13 LVB, DVB, Hochbahn, SSB MVG (bis Sep 14) • ab Apr 13 Bogestra, Hagen, SWK, TRD • ab Sept 13 Jasper, SBG • ab Okt 13 HVG •
Mrz 14: VHH (bis Sep 15), SBI (bis Sep 15) • ab Apr 14 üstra, AVG (bis Okt 14), BBW (bis Okt 14) • ab Aug 14 WVVG (bis Sep 15)

Das Potential der Technologie lässt sich anhand einer überschlägigen Abschätzung veranschaulichen. Unterstellt man einen Anteil von 10 % Hybridbussen an der Stadtbusflotte in Deutschland, ergibt sich ein jährliches Einsparpotential von ca. 40.000 t CO₂e oder den Treibhausgasemissionen einer Gemeinde mit 5.000 Einwohnern.

Für die Batteriebusse liegen aus betrieblichen Gründen bisher noch keine direkt vergleichbaren Verbrauchsdaten von Dieselnissen vor. Sobald diese verfügbar sind, kann eine Analyse der durch den Einsatz der Batteriebusse vermiedenen Treibhausgasemissionen vorgenommen werden. Die mit Batteriebussen erzielbaren Einsparungen hängen neben dem Energieverbrauch unmittelbar von der Bereitstellung der genutzten elektrischen Energie ab. Strom, der aus erneuerbaren Ressourcen erzeugt wird, weist hier gegenüber Strom, der aus fossilen Energieträgern wie Kohle oder Erdgas gewonnen wird, üblicherweise eine niedrigere Treibhausgas- bzw. Schadstoffintensität auf. Weitere Ausführungen zur Ermittlung der Umweltwirkungen am Beispiel der Treibhausgasemissionen finden sich im folgenden Abschnitt.

Lebenszyklusbasierte Umweltbewertung Batteriebus

Entsprechend der Motivation zum Einsatz von batterieelektrischen Bussen, die u.a. auf die Reduktion bzw. Vermeidung von Schadstoffemissionen im Betrieb abzielt, bietet sich für eine Bewertung der batterieelektrischen Antriebstechnologie ein ökologischer Vergleich mit dem konventionellen Dieselnissen als Referenztechnologie an. Basis des ökologischen Vergleichs bilden die durch den Einsatz der Busse verursachten Emissionen bzw. Umweltwirkungen. Ein solcher Vergleich bietet sich natürlich auch für andere innovative Antriebstechnologien wie z. B. den Dieselnissen- oder den Brennstoffzellenhybridbus an. Die im Folgenden vorgestellte Vorgehensweise ist für die ökologische Bewertung aller Antriebstechnologien gleichermaßen geeignet.

Mit Blick auf den Lebenszyklus eines Bussystems (siehe Abbildung 23), tritt im Falle des herkömmlichen Dieselnisses das Gros der Umweltwirkungen während des Linienbetriebs auf. Darüber hinaus ergeben sich zusätzliche Umweltauswirkungen aus der Dieselnissenkraftstoffbereitstellung sowie Herstellung, Wartung und Verwertung des Fahrzeuges. Betrachtet man nun den Batteriebus, ist der emissionsfreie Linienbetrieb zunächst einmal positiv, allerdings findet hier durch die Verwendung des Energieträgers Strom eine Verlagerung der Umweltwirkungen von der Nutzung auf die Bereitstellung des Energieträgers statt. Diese ist folglich zu berücksichtigen, wobei die Herkunft des Stroms von entscheidender Bedeutung ist. Je nachdem welche erneuerbare oder nicht erneuerbare Ressource

für die Stromerzeugung verwendet wurde ergeben sich erhebliche Unterschiede bezüglich der Umweltwirkungen je produzierter bzw. vom Bus verbrauchter kWh Strom.

Außerdem ist zu untersuchen, wie sich durch den Austausch bzw. das Hinzukommen von Antriebskomponenten, z.B. Tausch des Verbrennungsmotors gegen Elektromotor oder zusätzlicher Hochvolt-Energiespeicher, die Umweltwirkungen aus der Herstellung und Entsorgung des Fahrzeuges entwickeln. Bei der Wartung des Busses ergeben sich ebenfalls Änderungen, z.B. durch das Entfallen von Motor- und Getriebeölwechsel. Auch sind für die Energieversorgung der Batteriebusse andere bzw. zusätzliche Ladeinfrastrukturkomponenten erforderlich. Diese Unterschiede machen deutlich, dass im Sinne einer ganzheitlichen Betrachtung der Umweltauswirkungen der gesamte Lebenszyklus des jeweiligen Bussystems zu berücksichtigen ist.

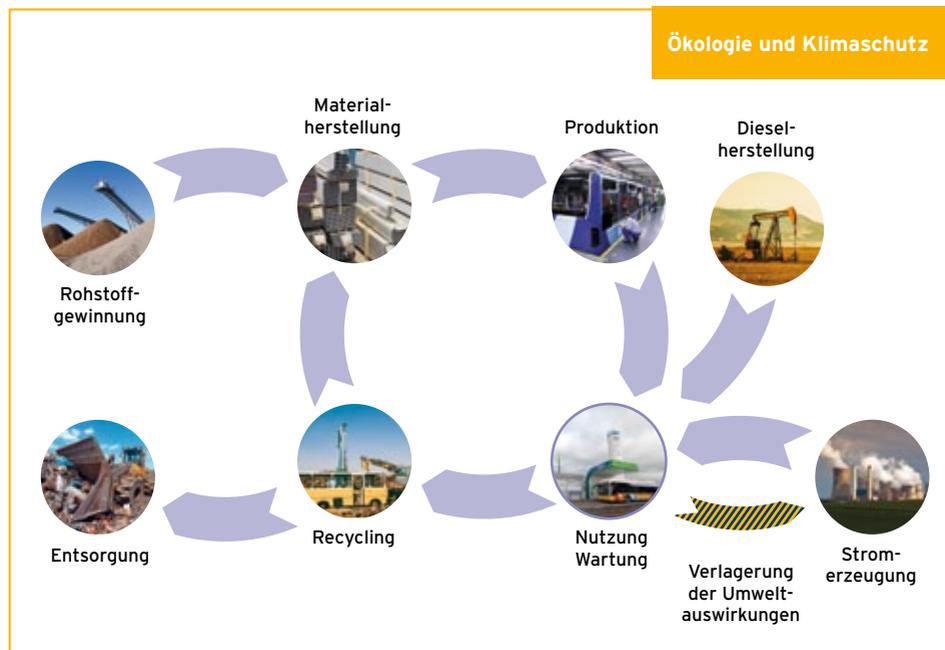


Abbildung 23: Lebenszyklus eines Bussystems

Vorgehensweise zur Ermittlung der Treibhausgase (THG)

An dieser Stelle erfolgt die exemplarische Betrachtung der THG- und der Stickoxidemissionen für einen Batteriesolobus im Vergleich zu einem Dieselsolobus. Die Untersuchung findet in Anlehnung an die VDV Mitteilung 2316¹⁵ und die DIN EN 16258¹⁶ statt, berücksichtigt dabei aber wie eingangs erläutert den gesamten Lebenszyklus der Bussysteme, d. h. im Sinne einer möglichst umfassenden Betrachtung werden zusätzlich zum Betrieb der Busse und der Bereitstellung der eingesetzten Energieträger auch die Herstellung und Verwertung der Busse einbezogen.

Basis der Betrachtung ist der Energieverbrauch der wie folgt ermittelt wird.

Batteriebus:

- Erfassung Stromverbrauch in kWh am Ladepunkt bzw. abrechnungsrelevanten Zähler unter Berücksichtigung der Ladeverluste und einer ggf. stattfindenden Vorkonditionierung im Depot
- bei Einsatz einer kraftstoffbasierten Zusatzheizung Erfassung des Kraftstoffbedarfs in Liter

Dieselsolobus:

- Erfassung Kraftstoffbedarf in l, inkl. ggf. über separaten Heiztank verbrauchte Kraftstoffmenge für Fahrgastraumheizung

Für Busse mit Hybrid oder Plug-In Hybridantrieb erfolgt die Ermittlung des Energieverbrauchs auf analoge Weise.

Im Sinne einer guten Vergleichbarkeit sind die Energieverbrauchsdaten für möglichst vergleichbare Einsatzbedingungen zu erfassen und das idealerweise über einen längeren Zeitraum von z.B. 12 Monaten um die jahreszeitlichen Einflüsse auf den Verbrauch mit zu erfassen.

¹⁵ VDV Mitteilung 2316: „Empfehlung zur Ermittlung des spezifischen Primärenergieverbrauchs und der Gesamtemissionen von Bussystemen, 1999

¹⁶ DIN EN 16258: Methode zur Berechnung und Deklaration des Energieverbrauchs und der Treibhausgasemissionen bei Transportdienstleistungen (Güter- und Personenverkehr), 2013. Auf Basis der Norm ist vom BMVI ein Leitfaden zur Berechnung der Treibhausgasemissionen des ÖPNV herausgegeben worden.

Zur Berechnung der betriebsbedingten THG-Emissionen des Batteriebusse ist nun noch der Treibhausgasfaktor des eingesetzten Stromes erforderlich. Dieser ergibt sich entsprechend des für die Strombereitstellung verwendeten Energieträgermix. Detaillierte Informationen zum Strommix sind über den Stromlieferanten zu bekommen. Sollten keine detaillierten Informationen verfügbar sein, kann entweder die Berechnung auf Basis der Angaben aus der Stromkennzeichnung des Lieferanten oder mit dem Durchschnittswert für den nationalen Strommix erfolgen. Dabei ist zu beachten, dass nicht nur die reinen CO₂ Emissionen berücksichtigt werden, sondern auch die weiteren Treibhausgase, z. B. Methan.

Datengrundlage

Im Sinne der hier exemplarisch durchgeführten Bestimmung der Treibhausgasemissionen wird die Berechnung zum Aufzeigen erster Bandbreiten einmal mit dem Durchschnittswert für den deutschen Strommix (Bezugsjahr 2014) und einmal mit dem sogenannten erneuerbaren Energienmix (EE-Mix) berechnet. Der EE-Mix ergibt sich aus der Zusammensetzung des Anteils erneuerbarer Energien am deutschen Strommix inkl. dem Strom aus Müllverbrennungsanlagen (siehe Abbildung 24). Die Treibhausgasemissionen für 1 kWh Strom aus dem deutschen Strommix betragen 578 g, gemessen in CO₂-Äquivalenten (CO₂e). Für den EE-Mix liegen sie bei 105 g CO₂e /kWh und damit um 78% niedriger im Vergleich zum nationalen Strommix. Darüber hinaus sind in Abbildung 24 noch die Treibhausgasfaktoren für Strom aus den Energieträgern Wind, Wasser und Sonne (PV) aufgeführt. Hier ergeben sich noch größere Reduktionspotentiale gegenüber dem deutschen Strommix. Für die Beispielrechnung wurde hier bewusst der EE-Mix gewählt, um den gegenwärtigen deutschen Grünstrom-Mix zu repräsentieren. Das Ausweisen von gegebenenfalls zu optimistischen Reduktionspotentialen gilt es zu vermeiden, gerade vor dem Hintergrund, dass die Batterieantriebstechnologie im Stadtbusbereich noch am Anfang ihrer Entwicklung und damit auch ihrer Bewertung steht.

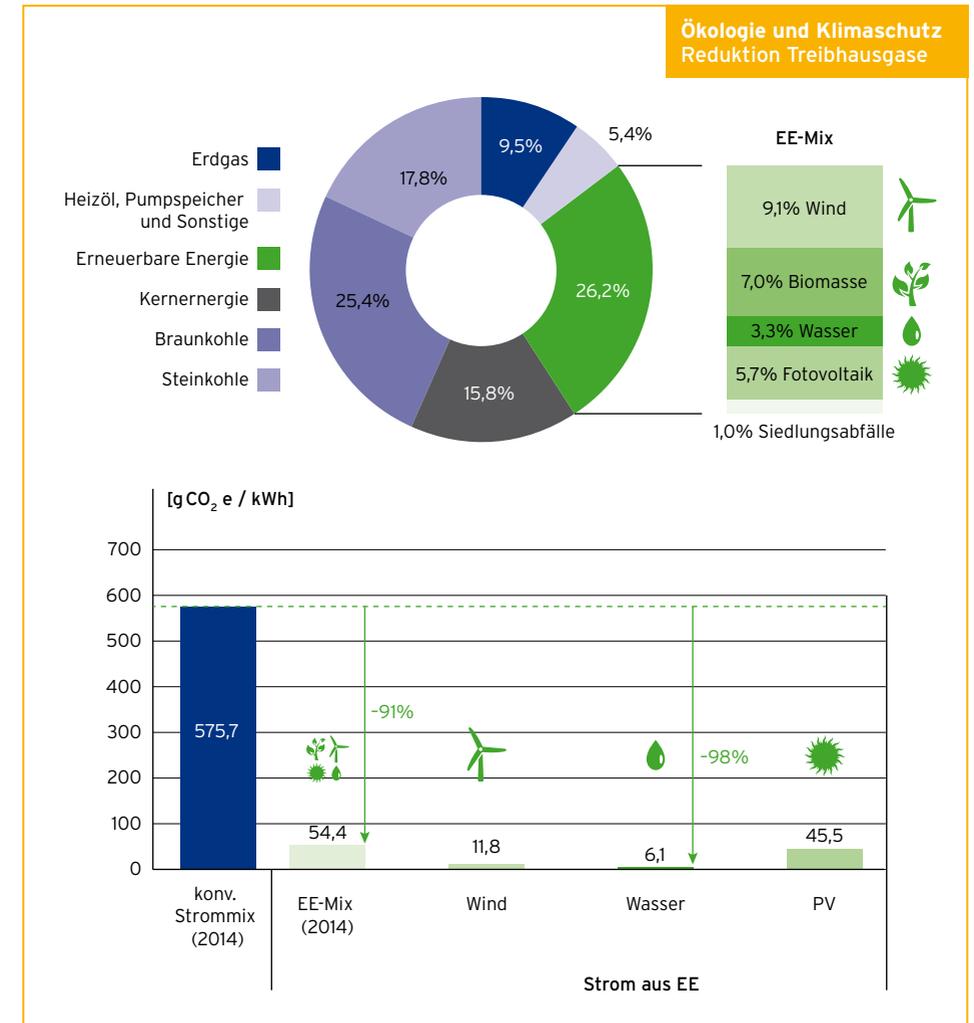


Abbildung 24: Strommix Deutschland und Treibhausgasemissionen der Strombereitstellung für 2014

Für die Berechnung der THG-Emissionen beim Dieselbus wird für die Bereitstellung des Dieselmotorkraftstoffes, der in Deutschland laut Eurostat¹⁷ üblicherweise einen volumetrischen Anteil von ca. 7 % Biodiesel enthält, ein Faktor von 0,45 kg/l Diesel (B7) (Quelle: GaBi¹⁸) und für die anschließende Verbrennung ein Faktor entsprechend DIN EN 16258 von 2,48 kg CO₂e/l Diesel verwendet.

Für die Herstellung und Verwertung der Fahrzeuge konnte auf umfangreiche Vorarbeiten von thinkstep zurückgegriffen werden. Hier standen Daten aus mehreren durchgeführten Ökobilanzstudien zu den verschiedenen Antriebstechnologien zur Verfügung.

Wie bereits in Kapitel 2.2 erwähnt, ist die Verfügbarkeit von vergleichbaren Verbrauchsdaten von Batterie- und Dieselbussen (unter möglichst vergleichbaren Randbedingungen wie gleiche Linie, ähnliche Verkehrsbedingungen, gleicher, idealerweise längerer Zeitraum etc.) aktuell noch nicht gegeben. Zur Veranschaulichung der lebenszyklusbasierten Ermittlung der THG-Emissionen wird daher die Berechnung anhand beispielhafter Verbräuche sowohl für die Diesel- und Batteriebusse gewählt. Diese werden entsprechend der Bandbreiten wie sie innerhalb der AG Bus für beide Bustechnologien beobachtet werden konnten, gewählt. Es ist daher wichtig zu beachten, dass die dargestellten Ergebnisse rein zur Illustration dienen und einen ersten Eindruck der möglichen Ergebnisbandbreiten vermitteln sollen. Sie stellen noch keinen direkten Vergleich der Bussysteme auf einer bestimmten Strecke dar.

Ergebnisse Treibhausgasemissionen

Bei einem Verbrauch von 40 l/100 km ergeben sich unter Berücksichtigung des gesamten Lebenszyklus pro 100 km ca. 129 kg Treibhausgase. Über den gesamten Lebenszyklus eines Dieselbusses (12 Jahre, 720.000 km) werden ca. 929 t Treibhausgase verursacht.

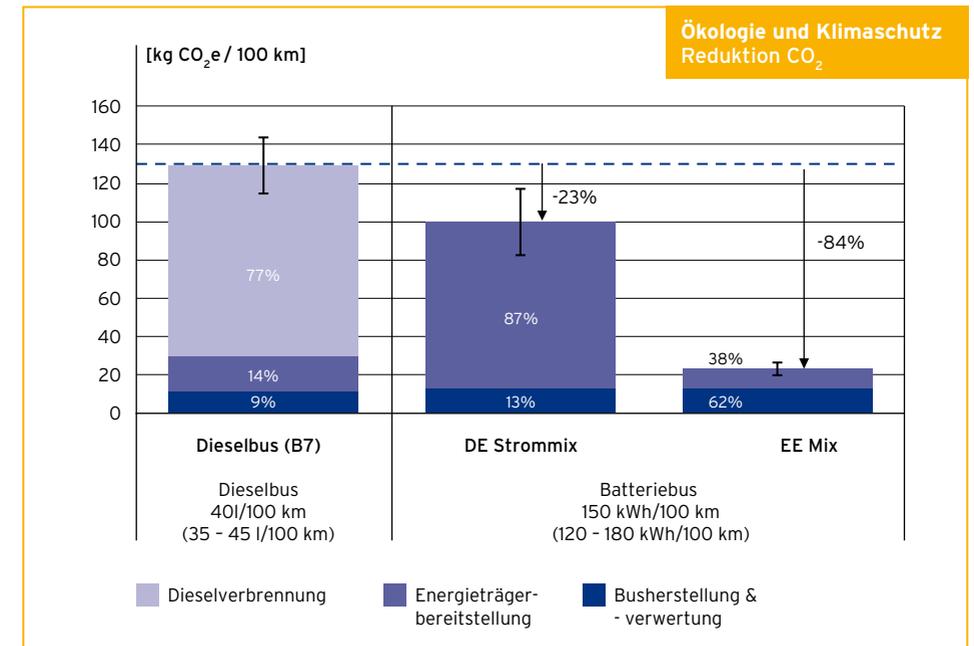


Abbildung 25: Beispielhafte Treibhausgasemissionen für Diesel und Batteriebusse

Im Sinne einer Sensitivitätsanalyse sind die Energieverbräuche jeweils entsprechend der in Abbildung 25 in Klammern genannten Werte variiert worden. So wurde der Kraftstoffverbrauch des Dieselbusses vom Basiswert 40 l/100 km ausgehend zwischen 35 und 45 l/100 km variiert. Analog ist als Basisverbrauchswert des Batteriebusses 150 kWh/100 km angenommen und zwischen 120 und 180 kWh/100 km variiert worden. Die jeweiligen Ergebnisse werden mit Hilfe von Indikatorbalken in Abbildung 25 dargestellt. Es ist zu erkennen, dass der Batteriebus innerhalb der angenommenen Verbrauchswerte bereits bei der Nutzung von Strom aus dem deutschen Strommix mit Blick auf seine Treibhausgasbilanz mindestens vergleichbar ist bzw. bereits ein erstes Einsparpotential aufweist. Kommt Strom aus dem erneuerbaren Energiemix zum Einsatz, ergibt sich ein erhebliches Einsparpotential in der Größenordnung von 80 %.

17 Statistisches Amt der Europäischen Union

18 Thinkstep: GaBi Software und Datenbanken zur Ganzheitlichen Bilanzierung. Stuttgart, Echterdingen, 1992 bis 2015.

Bei der Analyse der Relevanz der einzelnen Lebenszyklusphasen ist im Falle des Dieselsebusses die Nutzungsphase mit fast 80 % erwartungsgemäß dominierend. Die Energieträgerbereitstellung, in diesem Fall also die Bereitstellung von Dieseldieselkraftstoff, liegt bei 14 %, die Herstellung und Verwertung des Fahrzeuges hat einen Anteil von 9 %. Je nach Herkunft des genutzten Stroms steigt der Anteil der Fahrzeugherstellung und -verwertung beim Batteriebus auf bis zu 62 % an. Die Strombereitstellung ist beim Batteriebus, abhängig vom verwendeten Strom, für fast 40 % bis 90 % der verursachten Treibhausgase verantwortlich.

Abschätzung Einfluss Zusatzheizung

In Kapitel 2.2.4 wurde bereits detailliert die Relevanz des Energiebedarfs der Fahrgastraumheizung analysiert, gerade im Fall der Batteriebusse. Dies wirkt sich entsprechend auf die Treibhausgasemissionen aus. Für Dieselsebuse lässt sich aus der Langzeitdatenerfassung ableiten, dass in den Wintermonaten ein zusätzlicher Diesel- oder auch Heizölbedarf von etwa 2 l/100 km besteht. Die Indikatorbalken zeigen die Ergebnisse für 1 bzw. 3 l zusätzlichen Heizdieselbedarf.

Für den Batteriebus wird eine dieselbasierte Zusatzheizung mit einem Heizdieselbedarf von 10 l auf 100 km (abgeleitet aus Abbildung 17 in Kapitel 2.2.4) angenommen. Im Sinne einer Sensitivitätsanalyse wurden noch 5 bzw. 15 l/100 km Heizdieselbedarf berücksichtigt (siehe Indikatorbalken). Bei der Nutzung von Strom aus dem deutschen Strommix erhöhen sich durch den Energiebedarf der Fahrgastraumheizung die CO₂-Emissionen um ca. 31 kg/100km bzw. 31 %. Damit weist der Batteriebus in etwa vergleichbare THG-Emissionen wie der Dieselsebus bei einem angenommenen Verbrauch von 42 l/100km auf. Im Falle der Nutzung von EE-Mix-Strom steigen die Emissionen mengenmäßig um denselben Betrag, da nach wie vor die gleiche Menge an Heizdiesel benötigt wird. Relativ gesehen führt dies allerdings zu mehr als einer Verdopplung der Treibhausgasemissionen je km.

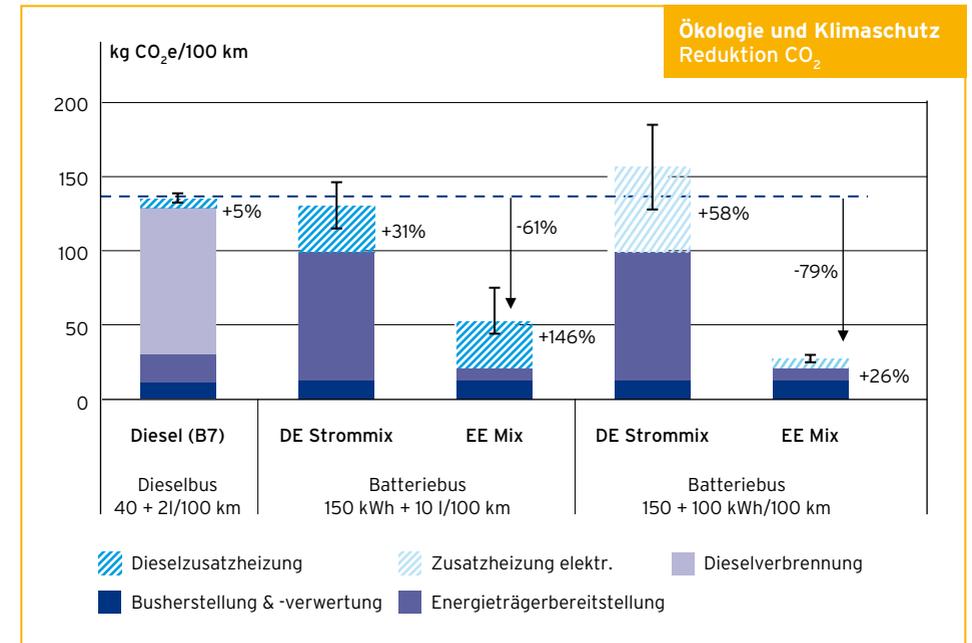


Abbildung 26: Abschätzung Einfluss Diesel- und Elektrozusatzheizung auf Treibhausgasemissionen

Wird der Batteriebus elektrisch geheizt, ergibt sich unter der vereinfachenden Annahme eines zur Dieselzusatzheizung konstanten Energiebedarfs ein Mehrbedarf von 100 kWh/100 km. Dies führt im Fall des mit konventionellem Strom betriebenen Batteriebusse zu einem Anstieg um 58 kg bzw. 58 %, statt 31 kg bzw. 31 %, und damit im Vergleich zum hier angenommenen Dieselsebus zu höheren THG-Emissionen. Im Falle des Betriebs des Batteriebusse mit Strom aus EE-Mix-Netz steigen die Treibhausgasemissionen aufgrund des Mehrverbrauchs der elektrischen Zusatzheizung um 26 % bzw. 5 kg an. Dies verdeutlicht den ökologischen Systemvorteil einer elektrischen Zusatzheizung bei der Nutzung von Strom aus erneuerbaren Energien gegenüber der Verwendung einer Dieseldieselzusatzheizung. Im vorliegenden Beispiel bleibt ein THG-Reduktionspotential von weiterhin knapp 80 % bestehen. Durch die Verwendung eines Energieträgers aus erneuerbaren Energiequellen wie z. B. Biodiesel kann zumindest aus THG Sicht die Umweltbilanz verbessert werden. Außerdem ist aus betrieblicher Sicht im Falle der elektrischen Zusatzheizung der Mehrbedarf an elektrischer

Energie zu berücksichtigen und, je nach Ladekonzept, die damit verbundenen längeren Ladedauern beim Gelegenheitsladen oder der Bedarf an einem größeren Batteriespeicher für Übernachtladung (siehe auch Kapitel 2.2.4).

Der Problematik des hohen Energiebedarf für Heizung und Klimatisierung im Stadtbus hat sich z.B. die TU Dresden im Projekt Pilotlinie 64 in Dresden angenommen und verschiedene Maßnahmen zur Reduzierung des Energiebedarfs entwickelt und bewertet (z.B.: Luft-Wärmepumpe, Heizstrahler, Luftwandanlage an den Türen, siehe weitere Informationen in Kapitel 2.2.5 und Kapitel 4.2).

Die Ergebnisse und die dabei zu beobachtende Verlagerung von Umweltwirkungen zwischen den einzelnen Lebenszyklusphasen verdeutlichen nochmals, dass für eine ganzheitliche Umweltbewertung der gesamte Lebenszyklus zu berücksichtigen ist.

>> 2.3.2 GERÄUSCHEMISSIONEN

Gerade in dicht bebauten Wohngebieten sind geringere verkehrsbedingte Geräuschemissionen von wesentlicher Bedeutung, vor allem im Hinblick auf die Erfüllung von ggf. erforderlichen Minderungsmaßnahmen zum Lärmschutz im Rahmen eines Lärminderungsplans nach BImSchG¹⁹. Vor diesem Hintergrund gilt es, die Lärminderungspotentiale innovativer, (teil)elektrifizierter Antriebstechnologien zu untersuchen. Hierzu wurden bereits im Statusbericht 2014 die von der RWTH Aachen im Rahmen des EFBEL-Projektes durchgeführten Lärmemissionsmessungen ausführlich vorgestellt. Die Geräuschemissionen, aufgeteilt in Innen- und Außengeräusch, wurden auf der hauseigenen Teststrecke des ika aufgezeichnet.

Zur Kategorisierung der Messungen in EFBEL wurde eine genauere Abbildung der psychoakustischen Zusammenhänge gewählt und angewendet. An Stelle von bewerteten Schalldruckpegeln wird die linear skalierte Lautheit der Geräuscheignisse berechnet. Weitere Details hierzu finden sich im Statusbericht 2014. Zusätzlich zu den in EFBEL durchgeführten Messungen konnten auch Messungen aus dem europäisch geförderten Projekt CIVITAS Dynamo für die Analyse genutzt werden.

Im Ergebnis zeigt sich eine deutliche Reduktion der Geräuschemissionen der Hybridfahrzeuge gegenüber den konventionellen Referenzfahrzeugen, und zwar unabhängig vom

Betriebsmodus. Für die beiden jeweils besten Fahrzeuge lässt sich eine Reduktion um ca. $\frac{2}{3}$ gegenüber den Geräuschemissionen des jeweiligen konventionellen Vergleichsfahrzeuges beobachten.

Batterieelektrische Busse wurden bisher zwar noch nicht vermessen, jedoch sind die getroffenen Aussagen zur Lautheitsbewertung der Dieselhybridbusse im Zero Emission Betrieb, d. h. im rein elektrischen Betrieb mit ausgeschaltetem Dieselverbrennungsmotor, prinzipiell auch auf Batteriebusse übertragbar. Daher ist zu erwarten, dass sie ebenfalls die genannten Vorteile hinsichtlich Geräuschemissionen aufweisen.

>> 2.3.3 ZERO EMISSION BETRIEB DIESELHYBRIDBUS – ANTEIL REIN ELEKTRISCHES FAHREN

Entsprechend des im vorangegangenen Abschnitt dargestellten Reduktionspotentials in Bezug auf Lärm und Schadstoffe im rein elektrischen Betrieb wurde im letzten Statusbericht für zwei Hybridbustypen betrachtet, welcher Anteil an rein-elektrischem Betrieb in der Praxis erreichbar ist. Hierzu wurden für einen seriellen Gelenk- sowie einen parallelen Solohybridbus, der reale Anteil an rein elektrischem Fahren im Linieneinsatz sowohl zeit- als auch streckenbezogen ermittelt. Diese Untersuchungen werden nachfolgend mit den Analyseergebnissen für einen seriellen Solohybridbusses ergänzt.

Vorab ist aber nochmals darauf hinzuweisen, dass die untersuchten Fahrzeuge unterschiedliche Hybridantriebsstrukturen mit entsprechend unterschiedlichen Auslegungsparameter sowie verschieden großen elektrischen Speichern aufweisen. Dadurch ergeben sich diverse Möglichkeiten zur Regelung des Antriebssystems. So kann die Betriebsstrategie vom Hersteller beispielsweise auf die Maximierung der Energieeffizienz ausgerichtet sein. Eine weitere Möglichkeit stellt die Maximierung des Anteils an lokal emissionsfreien Betrieb dar. Beim sogenannten „Zero-Emission“-Betrieb wird die Verbrennungskraftmaschine abgeschaltet und der Vortrieb erfolgt alleine über den elektrischen Antriebsteil. Allerdings ist dieser unter dem Aspekt der Schadstoffreduktion für den Betreiber durchaus erstrebenswerte Fahrmodus üblicherweise für die Gesamtenergieeffizienz der jeweiligen Hybridantriebskonzepte suboptimal (siehe auch Kapitel 2.2.2).

Prinzipbedingt weisen die seriellen Hybridbusse ein höheres Potential für den Anteil rein-elektrischen Fahrens im Vergleich zu Bussen mit Parallel-Hybrid auf. Während beim seriellen Hybrid im Wesentlichen die Größe des Energiespeichers die elektrische Reichweite

¹⁹ Bundes-Immissionsschutzgesetz

bestimmt, ist beim Parallel-Hybrid der rein elektrische Betrieb, wenn überhaupt vorgesehen, auf bestimmte Fahrzustände wie zum Beispiel Anfahrvorgänge beschränkt.

Für den seriellen Solohybridbus mit einem Supercap Speicher²⁰ konnten exemplarische Betriebsdaten für zwei Fahrzeugversionen (EEV²¹ und Euro VI) vom Hersteller ausgewertet werden. Die Daten des EEV Fahrzeugs stammen aus einem Kundeneinsatz und decken den Zeitraum eines Jahres ab. Die dabei erzielte Laufleistung lag bei 54.000 km. Für das Euro VI Fahrzeug stammen die Daten von einem Dauerläufer eines Herstellers aus dem Zeitraum 3. bis 4. Quartal 2014. Dabei ergaben sich die in Abbildung 27 dargestellten Zeitanteile für den rein elektrischen Betrieb, d.h. der Betrieb des Fahrzeugs erfolgt bei ausgeschaltetem Verbrennungsmotor.

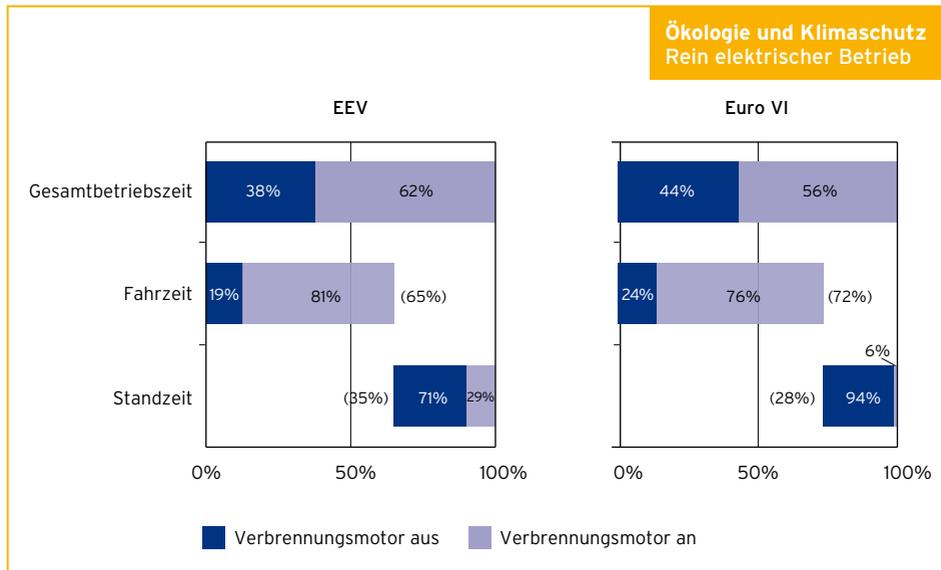


Abbildung 27: Anteil rein elektrischer Betrieb – Solo Seriell-Hybrid

²⁰ Der Energiespeicher hat einen Energieinhalt von ca. 0,4 kWh.

²¹ Abgasstandard Enhanced Environmental Friendly Vehicle (EEV), mit etwas strengeren Grenzwerten als Euro V Stufe

Für das EEV Fahrzeug ergibt sich in der Summe ein Zeitanteil in dem der Verbrennungsmotor aus ist von 38%, für das Euro VI Fahrzeug liegt er mit 44% nochmals darüber. Setzt man für das Euro VI Fahrzeug dasselbe Verhältnis zwischen Fahr- und Standzeit wie beim EEV Fahrzeug an (65%:35%), würde sich ein Anteil ‚Verbrennungsmotor aus‘ von 49% ergeben. Für die Verbesserung zwischen den beiden Fahrzeugversionen des betrachteten seriellen Solohybrids sind folgende Gründe zu nennen:

- Es konnte die Betriebszeit des Motors im Fahrbetrieb gesenkt werden.
- Gerade im Stillstand, d.h. wenn der Motor in den Leerlauf geht, stellt die Start-Stopp Automatik den Motor noch konsequenter ab.

War beim EEV Fahrzeug in 71% der Stillstandzeit der Motor abgestellt, ist das beim Euro VI Fahrzeug in 94% der Zeit der Fall.

Für das Euro VI Fahrzeug konnte auch der streckenbezogene Anteil für rein elektrisches Fahren ermittelt werden. Dieser lag bei 22%.



Obwohl die Betriebsstrategie laut Hersteller in erster Linie auf Kraftstoffeinsparung und nicht auf möglichst langes „rein elektrisches Fahren“ ausgelegt ist, werden trotzdem hohe, Verbrennungsmotor aus'-Zeitanteile erreicht die mit der Euro VI Version des Fahrzeugs nochmals erhöht werden.

Ergebnisse zu ‚Zero Emission‘ Betrieb aus EFBEL

Im EFBEL Projekt ist ebenfalls der Anteil des ‚Rein elektrischen Betriebs‘ für die im Rahmen des Projektes vermessenen Hybridbustypen ermittelt worden. In Abbildung 28 ist der Zeitanteil des ZE-Modus klassiert über der Geschwindigkeit für die untersuchten Hybridbustypen dargestellt.

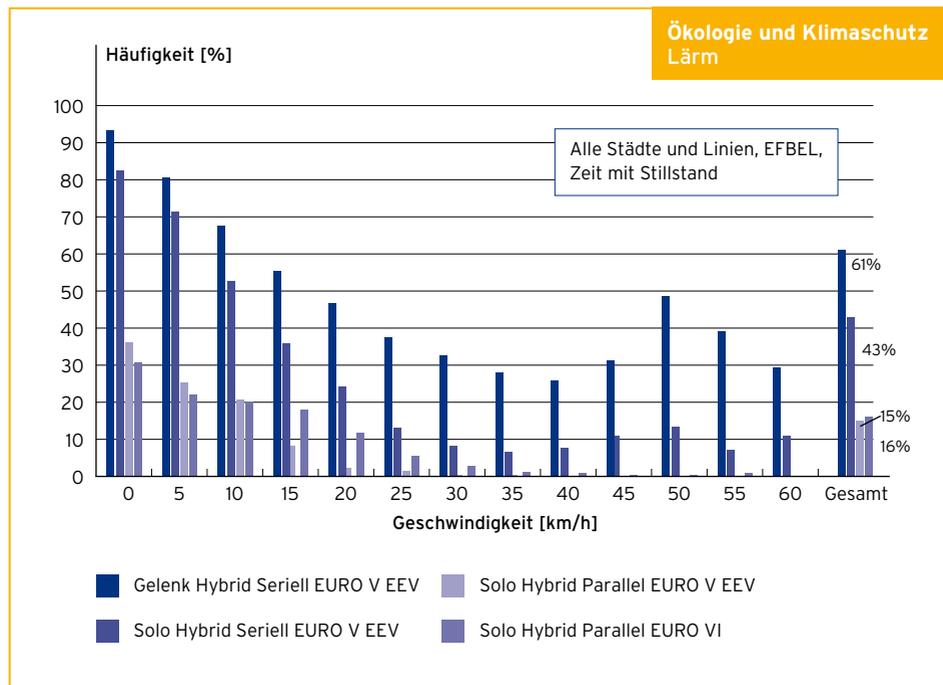


Abbildung 28: Zeitanteil des lokal emissionsfreien Betriebes der Hybridfahrzeuge in EFBEL

Der serielle Gelenk Hybrid 1 verfügt über die größte Batterie und nutzt die dadurch vorhandenen Möglichkeiten zur lokal emissionsfreien Fahrt mit einem zeitlichen Anteil von 61% aus. Gerade in niedrigen Geschwindigkeiten wird ein sehr großer Teil der Zeit ohne aktiven Verbrennungsmotor gefahren. Gemessen an der im Verhältnis geringen Größe seines Energiespeichers ist das Verhalten des seriellen Solo Hybrids durchaus bemerkenswert. Für dieses Fahrzeug ergibt sich ein Zeitanteil an rein elektrischem Betrieb von über 40%. Die Solo Busse mit parallelem Antriebsstrang weisen wie am Anfang des Kapitels erläutert prinzip bedingt niedrigere Anteile an ZE-Betrieb auf.

Während der im Linieneinsatz erzielbare Anteil an rein elektrischem Betrieb vom eingesetzten Hybridantriebskonzept, der verwendeten Energiespeichergöße und der gewählten Betriebsstrategie abhängt, zeigen die erzielten Ergebnisse zusammen mit den bereits im letzten Statusbericht vorgestellten Untersuchungen in der Gesamtschau die Bandbreite an erreichbarem Anteil rein elektrischen Betriebes mit Hybridbussen. Gerade im Stillstand, beim Halt an Haltestellen oder vor Lichtsignalanlagen, ist bei der Mehrheit der Hybridbusse der Motor den überwiegenden Teil der Zeit aus und bleibt dies zunächst auch bei den anschließenden Anfahrvorgängen, sofern nicht unter Volllast losgefahren wird. Damit leisten Hybridbusse gerade in diesen Betriebszuständen einen wesentlichen Beitrag zur Lärm- und Schadstoffreduktion und veranschaulicht nochmals die Vorteile, die sich aus der Elektrifizierung des Antriebsstranges in Stadtbussen ergeben.

Weitere Detailuntersuchungen des ökologischen Potentials von alternativen Antrieben nehmen die Projekte HELD in Hamburg und HyLine-S in Stuttgart vor.



Zusammenfassung der Ergebnisse zu Ökologie und Klimaschutz

Dieselhybridbusse

⇒ Klimaschutz und Ressourcenschonung:

Die betrachteten Dieselhybridbusse haben seit Anfang 2013 ca. 3.000 t CO₂ Äquivalente bzw. 1 Mio. l Dieselkraftstoff vermieden. Über ihre Lebensdauer werden sie ca. 19.000 t CO₂e einsparen. Bei einem angenommenen Anteil von 10 % an der Stadtbusflotte in Deutschland ergibt sich ein jährliches Einsparpotential von ca. 40.000 t CO₂e.

⇒ Schadstoffemissionen:

Unabhängig vom Abgasstandard wiesen die Hybridbusse ein erhebliches Reduktionspotential bei Schadstoffen gegenüber konventionellen Dieseln auf. Beispielsweise ergaben sich für NO_x bei den Hybridbussen mit Euro V/EEV Einsparungen von bis zu -51% gegenüber vergleichbaren konventionellen Dieselreferenzbussen und liegen damit bereits auf Euro VI Niveau. Für Fahrzeuge der Abgasnorm Euro VI ergab sich für das Hybridfahrzeug eine NO_x Reduktion von 91%. Abhängig von der Antriebstechnologie ist der zeitweise Betrieb im Null Emissions-Modus möglich (im Stand an Haltestellen und Ampeln ist der Dieselmotor in bis zu 94% der Zeit aus. Daher erfolgt das Anfahren aus der Haltestelle ebenfalls mehrheitlich rein elektrisch), daraus ergibt sich die entsprechende Reduktion von Schadstoffen und Lärm für Anwohner und Fahrgäste, gerade an Haltestellen.

⇒ Lärmemissionen: Bei den Dieselhybridbussen ergibt sich durch das rein elektrische Anfahren eine Reduktion der Lautheit um über 65% gegenüber konventionellen Dieseln.

Batteriebusse

⇒ Klimaschutz und Ressourcenschonung:

Nicht zuletzt aufgrund der Verlagerung der Emissionen vom Busbetrieb in die Energieträgerbereitstellung erweist sich die Betrachtung des gesamten Lebenszyklus als sinnvoll. Erste beispielhafte Analysen veranschaulichen die starke Abhängigkeit der erzielbaren Einsparpotentiale nicht nur vom Energieverbrauch (Stichwort zusätzlicher Energiebedarf für die Fahrgastraumheizung), sondern auch von der Treibhausgasintensität des verwendeten Stroms. Wird Strom aus erneuerbaren Energien verwendet, zeichnet sich ein Reduktionspotential von 80% und mehr gegenüber Dieseln ab.

⇒ Schadstoff- und Lärmemissionen:

Prinzipiell ermöglichen die batterieelektrischen Busse den lokal emissionsfreien Betrieb. Die Reduktionspotentiale in Bezug auf die Lärmemissionen sind vom Dieselhybridbus im rein elektrischen Betrieb auf die Batteriebusse übertragbar.

>> 2.4 WIRTSCHAFTLICHKEIT

Die mit den innovativen Antriebstechnologien verbundenen Kosten über den gesamten Lebenszyklus der Busse und ihre perspektivische Entwicklung sind für die erfolgreiche Markteinführung dieser Technologien ein ganz wesentlicher Faktor.

Hierzu werden im Rahmen der Evaluationsaktivitäten die Kosten im Linienbetrieb für Hybridbusse und konventionelle Diesel-Referenzbusse ermittelt und einander gegenübergestellt. Eine Bestimmung der Kosten kann zum jetzigen Zeitpunkt nur näherungsweise erfolgen, da die Erfahrungsbasis für die noch junge Technologie sich nach wie vor im Aufbau befindet. So weisen die Busse weiterhin Optimierungspotentiale auf und es liegen aktuell bestenfalls 5 Jahre Betriebserfahrungen mit den Hybridbussen vor. Da die Technologie der batterieelektrischen Busse noch stärker am Anfang ihrer technologischen Entwicklungskurve steht, sind Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen gegenwärtig noch nicht wirklich aussagekräftig. Eine Kostenanalyse der batterieelektrischen Busse wurde daher noch nicht durchgeführt.

Entsprechend dem Ziel, die jeweiligen Mehr- oder Minderkosten der Hybridtechnologie im Vergleich zur Referenztechnologie (konventioneller Dieselantrieb) zu ermitteln, werden einerseits die fahrzeugbezogenen Kosten und andererseits die systembedingten Zusatzkosten bestimmt.

Hierzu wurde das Kostenmodell aus dem vorangegangenen BMU-Begleitprogramm in Abstimmung mit den beteiligten Verkehrsbetrieben fortgeschrieben und aktualisiert. In diesem Kalkulationsmodell werden die

- anzunehmenden Instandhaltungskosten für Referenz- und Hybridbusse im Lebenszyklus mit typischem Aufwand für die Fahrzeugversorgung (Reinigung, Betankung etc.),
- im Praxisbetrieb ermittelten Kraftstoffverbräuche,
- Kapitaldienste und
- sonstigen fahrzeugbezogenen Kosten sowie
- systembedingten Zusatzkosten

zu einer typisierenden Gesamtdarstellung zusammengeführt.

Hochgerechnet auf 12 Nutzungsjahre und 60.000 km p.a. ergibt sich danach derzeit folgende Situation (siehe Abbildung 29):

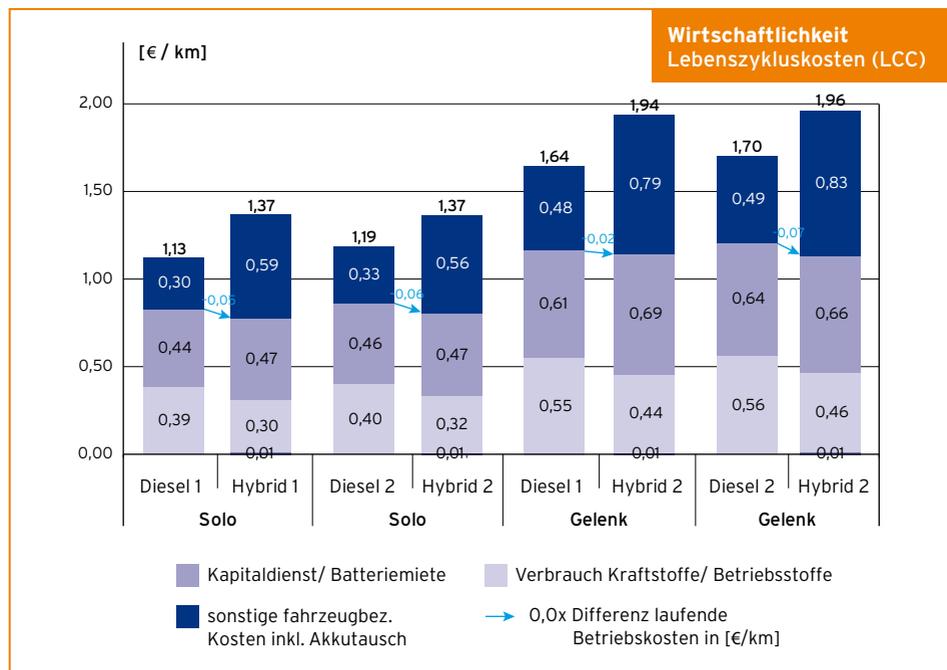


Abbildung 29: Gesamtkosten Hybrid und Dieselreferenzbusse im Vergleich (normiert auf 60 Tkm p.a. und Nutzungsdauer 12 Jahre, ohne Förderung)

Insgesamt ist festzustellen, dass sich die Mehrkosten der Hybridfahrzeuge gegenüber der Situation 2011/2012 reduziert haben. So betragen sie ohne Förderung bei den Solobussen jetzt 17 bis 23 ct/km (damals: ca. 25 ct/km) und bei den Gelenkbussen 25 bis 29 ct/km (damals 32 ct/km).

Die Reduktion der Mehrkosten um bis zu 8 ct/km gegenüber 2011 ist im Wesentlichen zurückzuführen auf:

- z. T. geringere Anschaffungsmehrkosten²² und
- höhere Kraftstoffeinsparung.

²² Zum Beispiel sank der Fahrzeugpreis bei einem Gelenkhybridfahrzeugtyp zwischen 2011 und 2014 um 20.000 €. Außerdem sind mittlerweile weitere Hersteller mit Hybridfahrzeugen auf den Markt gekommen, deren Mehrkosten nochmals niedriger sind, allerdings ist zu berücksichtigen ob ggf. zusätzliche Kosten für Batteriemieten oder -tausch anfallen.

Wie die Abbildung 29 zeigt, erhält das Verkehrsunternehmen bzw. der Fahrgast über eine rein betriebswirtschaftliche Betrachtung kein Signal, umweltschonendere Technologien zu nutzen. Über die Einbeziehung von Umweltkosten finden die mit finanziellen Aufwendungen bewerteten externen Effekte, die sich aus der Beeinträchtigung der Natur und potentiellm Schaden an der menschlichen Gesundheit ergeben, Eingang in eine damit noch vollständigere Gesamtkostenbetrachtung. Basierend auf der vom Umweltbundesamt erarbeiteten Methodenkonvention 2.0 zur Schätzung von Umweltkosten²³ können diese am Beispiel von Solobussen, die die Euro V bzw. VI Norm erfüllen, abgeschätzt werden.

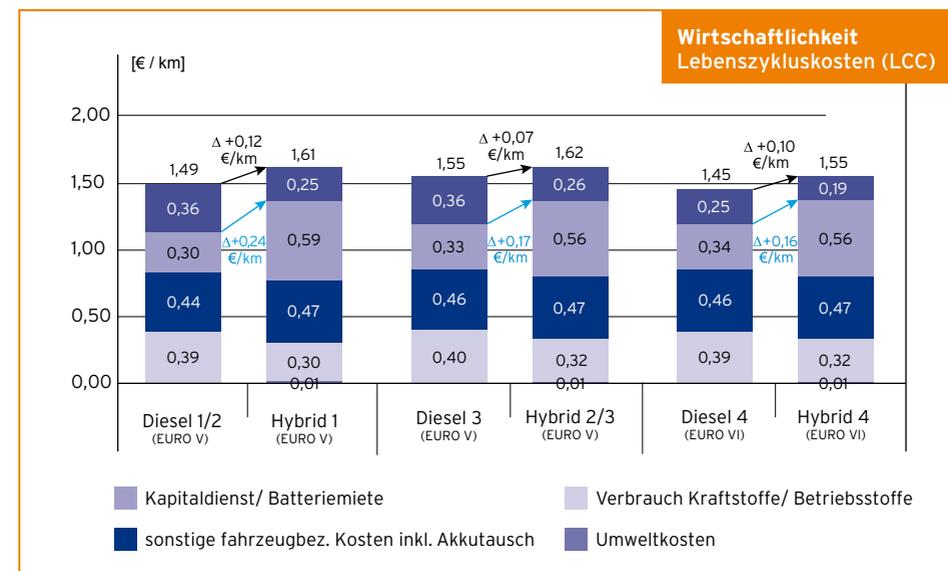


Abbildung 30: Gesamtkosten Solobusse (Euro V und VI) inkl. abgeschätzter Umweltkosten (ohne Förderung)

²³ Die Methodenkonvention 2.0 des Umweltbundesamtes schafft eine Grundlage zur ökonomische Bewertung von Umweltschäden in dem Kostensätze für einzelne Luftemissionen (z.B. CO₂, NO_x, PM), Lärmemissionen sowie Schäden an Natur und Landschaft ermittelt werden. Dabei wird auch die Schädigungen der Luftschadstoffemissionen auf Umwelt und Gesundheit in Abhängigkeit der Höhe der Emissionsquelle und der Bevölkerungsdichte in der Nähe der Emissionsquelle berücksichtigt. Daher unterscheiden sich auch die Umweltkosten pro Tonne Emission im Verkehr und z.B. in der Energieerzeugung.

Lag die Differenz bei einer rein betriebswirtschaftlichen Betrachtung noch bei 24 bzw. 18 €-cent/km für die Euro V Hybride, beträgt sie unter Berücksichtigung der abgeschätzten Umweltkosten noch 12 bzw. 7 €-cent/km. Aufgrund der strengeren Abgasgrenzwerte der Euro VI Norm und der damit einhergehenden niedrigeren Umweltkosten reduziert sich die Differenz der Gesamtkosten für den Euro VI Hybrid in etwas geringerem Umfang von 16 auf 10 €-cent/km.

Dabei ist zu berücksichtigen, dass sich die Reduktion der Mehrkosten auf Basis der Berücksichtigung der Umweltkosten für den Verkehrsbetrieb nur dann tatsächlich materialisiert, wenn die vermiedenen Umweltkosten kompensiert werden, z. B. durch die öffentliche Hand.

Es zeigt sich aber auch, dass selbst unter Einrechnung der Umweltkosten die Hybridbusse unter den gegenwärtigen Rahmenbedingungen Mehrkosten aufweisen. Sie können allerdings im Zuge einer anfänglichen Marktunterstützung durch eine Förderung beispielsweise der Anschaffungsmehrkosten, teilweise kompensiert werden. Dies geschieht z. B. im Rahmen verschiedener Förderprogramme von BMVI und BMUB. Merkmal einer solchen unterstützenden Fördermaßnahme ist aber in aller Regel eine zeitliche Befristung bzw. eine über die Zeit rückläufige Förderung. Daher sind hier die Fahrzeughersteller gefordert, die Anschaffungsmehrkosten bzw. die Betriebskosten z. B. durch eine weitere Verbesserung der erzielbaren Kraftstoffeinsparungen weiter zu reduzieren, da die Technologie nur so im Wettbewerb bestehen und sich am Markt etablieren kann.

Erste Erkenntnisse aus Einzelvorhaben zu Batteriebussen

Für die Batteriebusse ist bislang noch keine umfassende Wirtschaftlichkeitsberechnung abgeschlossen. Erste Erkenntnisse der Verkehrsbetriebe verdeutlichen jedoch den derzeit noch sehr hohen Investitionsaufwand für Fahrzeuge und Infrastruktur. Im Projekt FREE in Kassel lagen während der Projektlaufzeit die Kosten pro Fahrplankilometer, bezogen auf 1.500 km Laufleistung pro Monat mit Übernachtladung, im Vergleich zu Dieselbussen deutlich höher. Zur Ermöglichung eines wirtschaftlichen Einsatzes über das Ausspielen des Energiekostenvorteils ist aus Sicht der KVG unter den konkret angenommenen Randbedingungen eine Verdreifachung der Laufleistung erforderlich. Dies wiederum erfordert Zwischennachladungen im Betrieb, die ihrerseits Investitionskosten für die Ladeinfrastruktur verursachen. So kommt man hier zu der Einschätzung, dass der großflächige Elektrobus-Einsatz betriebswirtschaftlich nur dann darstellbar wird, wenn entweder bei gleichbleibendem Strompreis und gleichen Beschaffungskosten ein Liter Diesel ein Mehr-

faches des aktuellen Preisniveaus kostet oder die Kosten für die Busbeschaffung inkl. Ladeinfrastruktur für Gelegenheitsladen auf der Strecke bei gleichbleibenden Energiepreisen in einer Größenordnung von ca- $\frac{2}{3}$ sinken.

Weitere Untersuchungen zum Thema Wirtschaftlichkeit, auch im Vergleich zu konventionellen Stadtbussen wurden bzw. werden noch in den Projekten E-Bus Berlin, Primove Mannheim und HELD durchgeführt.

Zusammenfassung der Ergebnisse zur Wirtschaftlichkeit

Dieselhybridbusse

- ⇒ Mehrkosten Dieselhybrid: Es bestehen weiterhin Mehrkosten für Hybridbusse (15 bis 21%, für Solobusse bei 17 bis 23 ct/km und Gelenkbusse bei ca. 25 bis 29 ct/km). Allerdings ist eine Reduktion der Mehrkosten gegenüber den Ergebnissen aus der früheren Begleitforschung um bis zu 8 ct/km zu beobachten.
- ⇒ Die Berücksichtigung der externen Kosten reduziert die Mehrkosten bei den Solobussen auf 7 bis 12 ct/km (Euro V) und 10 ct/km (Euro VI). Allerdings materialisiert sich diese Reduktion für den Verkehrsbetrieb nur, wenn eine Kompensation für die vermiedenen Umweltkosten z. B. durch die öffentliche Hand stattfindet.
- ⇒ Auch bei Einrechnung der Umweltkosten weisen die Hybridbusse unter den gegenwärtigen Rahmenbedingungen Mehrkosten auf. Ein Teil der Mehrkosten kann im Zuge der Markteinführung und -unterstützung für einen begrenzten Zeitraum durch eine (anteilige) Förderung beispielsweise der Anschaffungsmehrkosten kompensiert werden. Damit sich die Technologie aber dauerhaft im Markt etabliert, bedarf es weiterer ⇒ ⇒ Anstrengungen der Hersteller, die Anschaffungsmehrkosten bzw. die Betriebskosten z. B. durch eine weitere Verbesserung der erzielbaren Kraftstoffeinsparungen in wesentlichem Maße zu reduzieren.

Batteriebusse

- ⇒ Aufgrund des derzeitigen Entwicklungsstandes der Batteriebusse und der momentan noch sehr eingeschränkt vorhandenen Betriebserfahrungen ist eine Betrachtung der Wirtschaftlichkeit derzeit noch nicht aussagekräftig. So sind mit steigendem Reifegrad der Technologie u.a. niedrigere Investitionskosten und höhere Verfügbarkeitswerte zu erwarten.

>> 2.5 NUTZERAKZEPTANZ

Da die Themenbereiche Qualifikation und Akzeptanz bereits intensiv in früheren Begleitforschungsaktivitäten betrachtet wurden, bilden sie in den aktuellen Evaluationsaktivitäten der AG keinen expliziten Schwerpunkt. Weitergehende Akzeptanzuntersuchungen werden durch die Einzelprojekte vorgenommen, abhängig von der thematischen Zielsetzung des Projektes. Im Folgenden werden daher erste Ergebnisse aus den von Spilett durchgeführten sozialwissenschaftlichen Untersuchungen im Projekt E-Bus Berlin vorgestellt.

Ob die Einführung und der Einsatz von innovativen Technologien erfolgreich verläuft, hängt nicht zuletzt von einer breiten gesellschaftlichen Akzeptanz ab. Deshalb ist es besonders wichtig, eventuelle Bedenken und Hemmnisse bei den Projektbeteiligten und in der Öffentlichkeit frühzeitig aufzudecken und zu evaluieren. Nur so können entsprechenden Gegenmaßnahmen geplant und entwickelt werden.

Mit einem zweiphasigen Vorgehen werden die Erwartungen und Erfahrungen sowohl vor als auch während des Linienbetriebs erhoben. Die Nutzerakzeptanz der unterschiedlichen Akteursgruppen wurde vor Beginn des Linienbetriebs mithilfe qualitativer Interviews untersucht. Bevölkerung, Fahrpersonal, Mitarbeiter der beteiligten Projektpartner und Verantwortliche in Politik und Verwaltung konnten so ihre persönlichen Erwartungen an die Batteriebusse schildern. 2014 wurden im Rahmen von 23 bis zu 60 minütigen, leitfadengestützten Interviews sowohl Anwohner der Linie 204 und der Linie 192 befragt. Eine Fahrgastbefragung nach der Aufnahme des Linienbetriebs soll Aufschluss darüber geben, ob und die die neue Technologie von den Fahrgästen wahrgenommen wird.

Die Auswertung der bisherigen Akzeptanzuntersuchung hat ergeben, dass die befragten Einwohner Berlins dem E-Bus Berlin Projekt tendenziell wohlwollend gegenüberstehen. E-Mobilität im ÖPNV und erzielbare Umweltvorteile werden besonders geschätzt. Auch das Induktionsladesystem wird hinsichtlich der oftmals angeführten Reichweitenproblematik positiv bewertet. Bedenken wurden hinsichtlich der hohen Kosten und der Zuverlässigkeit geäußert. Außerdem wurden Gesundheitsrisiken und mangelnde Umweltfreundlichkeit vermutet.

Umfragen unter dem Fahrpersonal und Fahrgästen im Projekt SEB-EDDA haben bereits gezeigt, dass insbesondere das ruckfreie Fahrverhalten sowie die geringe Geräuschbelastung der Batteriebusse positiv bewertet werden. Dies deckt sich mit Ergebnissen aus früheren Untersuchungen zu Dieselhybridbussen, z. B. vom ika der RWTH Aachen.

Weitere Untersuchungen zum Thema Akzeptanz wurden und werden noch in den Projekten inmod und HELD durchgeführt.

Zusammenfassung der Ergebnisse zur Nutzerakzeptanz

- ⇒ Erste Untersuchungen zeigen Aufgeschlossenheit der Bevölkerung gegenüber der neuen Technologie aufgrund seiner Umweltvorteile
- ⇒ Hohe Kosten der Technologie, eine geringere Zuverlässigkeit als konventionelle Technologien und angenommene Gesundheitsrisiken wurden als mögliche Akzeptanzrisiken für die induktive Ladetechnologie identifiziert.
- ⇒ Von den Fahrgästen werden das ruckfreie Fahrverhalten und das geringere Geräuschniveau der Busse mit elektrischem Antrieb positiv bewertet.



>> 3 ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Vor dem Hintergrund steigender Anforderungen bei der Luftreinhaltung in Städten werden bei einer wachsenden Zahl von deutschen Verkehrsunternehmen Linienbusse mit innovativen Antriebskonzepten in der Praxis erprobt, die zur Reduzierung von Luftschadstoffen und zur Vermeidung von klimaschädlichen Treibhausgasen beitragen. Das Ziel der Entwicklung ist dabei ein vollständig elektrisch angetriebener Bus, der keine fossilen Treibstoffe verbrennt und leise ist. Die Umsetzung erfolgt über Hybrid- und Plug-In-Hybridbusse hin zu reinen Elektrobussen, die über größere Hochleistungsbatterien, externe Ladeeinrichtungen auf den Strecken oder Brennstoffzellen mit Energie versorgt werden. Unterstützt werden diese Maßnahmen über Förderprogramme auf Bundes- und Landesebene im Rahmen der Forschung und der Entwicklung von Elektrobussen nebst dazugehöriger Ladeinfrastruktur. Für bereits etablierte Konzepte wie Hybridbusse stehen Markteinführungsprogramme zur Verfügung.

Die von BMVI und BMUB initiierte Arbeitsgruppe (AG), Innovative Antriebe Bus' dient in diesem Zusammenhang als Plattform für den Informations- und Erfahrungsaustausch zwischen Verkehrsunternehmen, Busherstellern, Forschungsinstitutionen und den Bundesministerien. Sie bündelt die Ergebnisse sowohl der Forschungsprojekte wie auch der Markteinführungsprogramme des Bundes und ist offen für weitere Akteure z. B. aus von den Ländern oder von der EU geförderten Projekten. Durch diese Zusammenführung der Aktivitäten gelingt eine systematische, ressortübergreifende Gesamtschau der Erfahrungen und Erkenntnisse. Synergien bei der Technologiebewertung können genutzt werden, um die wesentlichen künftigen Handlungsfelder auf dem Weg zu uneingeschränkt praxistauglichen, emissionsfreien Bussen zu ermitteln und die sich noch ergebenden Forschungsbedarfe besser aufeinander abzustimmen.

Die kontinuierlich hohe Beteiligung aller Akteure in der AG dokumentiert deren Bereitschaft, Erfahrungen aus der Praxis zu teilen und die Systeme hinsichtlich ihrer technischen und betrieblichen Praxistauglichkeit gemeinsam zu bewerten. Dabei stehen die Potentiale zur Steigerung der Energieeffizienz, Vermeidung von Luftschadstoffen und Lärm sowie die Betrachtung der Wirtschaftlichkeit im Fokus.

Für Kommunen und kommunale Aufgabenträger liegt der Mehrwert der Ergebnisse der AG vor allem in einem besseren Verständnis der technischen und betrieblichen Eignung der verschiedenen innovativen Antriebstechnologien im Abgleich mit den örtlichen Linienanforderungen und Leistungsvorgaben. Damit können die für das jeweilige Verkehrsgebiet passende Lösung abgeleitet und die Attraktivität des ÖPNV Angebots weiter verbessert wer-

den. Des Weiteren kann der Beitrag zur Erreichung der gesetzlichen Anforderungen an die Luftqualität sowie zum kommunalen Klimaschutzkonzept zukunftsgerichtet bewertet werden. Nicht zuletzt geben die Ergebnisse eine Indikation zu den wirtschaftlichen Auswirkungen auf die künftigen Haushalts- und Ressortplanungen für den ÖPNV.

Dieselhybridbusse

Aus der Begleitung des Betriebs von mehr als 150 Hybridbussen, zum Teil über mehrere Jahre, stehen umfangreiche Daten zur Verfügung, die eine gut abgesicherte Bewertung ermöglichen. Demnach kann der Dieselhybridbus die üblichen Anforderungen des Linienbetriebs inzwischen weitgehend abdecken. Die Verfügbarkeit liegt je nach Antriebskonzept über 90% und weist damit annähernd vergleichbare Werte auf wie der Dieselbus. Die erzielten Kraftstoffeinsparungen betragen bei einem Einsatz auf geeigneten Linien 20% und mehr. Im Hinblick auf die Reduktion von Schadstoff- und Lärmemissionen weisen sie gegenüber vergleichbaren Dieselbussen ein nochmals höheres Einsparpotential auf, vor allem wenn das Antriebskonzept einen zeitweise rein-elektrischen Betrieb, z. B. beim Halten sowie beim An- und Abfahren von Haltestellen oder Ampeln ermöglicht.

Trotzdem ist ein wirtschaftlicher Betrieb der Hybridbusse unter den aktuellen Rahmenbedingungen (z. B. Kraftstoffpreis, Anschaffungsmehrkosten) noch nicht möglich. Hier bedarf es zusätzlicher Entwicklungsanstrengungen, um die Kosten zu senken und weitere Kraftstoffeinsparungen zu erreichen.

Dieses gilt ebenso für die Verbesserung der Verfügbarkeit, insbesondere der Komponenten im Antriebsstrang (z. B. E-Motoren, Getriebe, Kühler). Allerdings wird sich erst mit fortschreitendem Fahrzeugalter zeigen, ob und welche Komponenten sich hier als kritisch erweisen. Von Bedeutung ist vor allem die Frage, ob die Batteriespeicher eine Lebensdauer von 5 Jahren oder eventuell mehr erreichen, da dieses erhebliche Auswirkungen auf die Betriebskosten hat. Weitere Themen sind beispielsweise die Ersatzteilverfügbarkeit und die vermehrte Durchführung von Instandhaltungsarbeiten an den Hybridbussen durch die eigenen Werkstätten.

Batterieelektrische Busse

Da Elektrobussen noch in einer frühen Entwicklungsphase sind und zumeist noch auf gezielt ausgewählten Linien eingesetzt werden, sind belastbare Aussagen zu ihrer technischen Reife und einen netzweiten Dauerbetrieb zurzeit kaum möglich. Allerdings können auf der Basis der Daten zu einzelnen Fahrzeugen (4 Midibusse, 12 Solo- und Gelenkbusse) erste Tendenzen aufgezeigt werden.

So liegt die Verfügbarkeit nach rund 6 Monaten Betrieb im Mittel bei ca. 75 %. Mit Blick auf den Entwicklungsstand der Technologie erscheint dieser Wert akzeptabel, zumal dieser dem anfänglich bei den Hybridbusse erzielten Wert entspricht bzw. bei Betrachtung einzelner Betreiber sogar etwas besser ist. Neben den Bussen kommt der Ladeinfrastruktur eine hohe Bedeutung für das in seiner Komplexität wachsende Gesamtsystem zu. Dieses gilt insbesondere, wenn vorhandene Infrastruktur genutzt werden soll. So erweist sich beispielsweise der Anschluss an die Energieversorgung von Straßenbahnen aufgrund starker Spannungsschwankungen als technisch anspruchsvoll.

Im Hinblick auf den Energiebedarf spielt die Liniencharakteristik möglicherweise eine geringere Rolle, von Bedeutung sind hingegen saisonale Effekte. So führt in der kalten Jahreszeit die fehlende Abwärme des Verbrennungsmotors zu einem zusätzlichen Wärmebedarf für den Fahrgastraum, der abhängig von der Außentemperatur, durchaus zu einer Verdoppelung des Gesamtenergieverbrauchs führen kann. Dies hat bei Nutzung einer elektrischen Heizung entscheidenden Einfluss auf die Reichweite bzw. die Ladezeiten der Busse sowie die Zahl der erforderlichen Ladeeinrichtungen.

Ökologische Vorteile der Elektrobusse sind der leise Antriebsstrang und der lokal emissionsfreie Betrieb. Allerdings ist zu berücksichtigen, dass die Umweltwirkungen bei E-Bussen vom Betrieb auf die Bereitstellung der Energie verlagert werden. Es zeigt sich erneut, dass eine Betrachtung des gesamten Systems, idealerweise über seinen Lebenszyklus, erforderlich ist. Wird Energie aus erneuerbaren Quellen verwendet, ergibt sich beispielsweise bei den Treibhausgasemissionen (u. a. Kohlendioxid) ein Reduktionspotenzial von 80 % und mehr gegenüber Dieselbussen.

Die Effizienz des Antriebsstrangs ist von zentraler Bedeutung. Mit einem sinkenden Energieverbrauch reduzieren sich nicht nur die Umweltbelastungen, sondern auch die Kosten und der Bedarf an Ladeinfrastruktur. Gerade der Bedarf kürzerer bzw. weniger Ladevorgänge wirkt sich positiv auf die betriebliche Stabilität aus. Folglich steht die Optimierung des Antriebssystems und der Nebenverbraucher sowie des Ladevorganges (Stromstärke, Ladeleistung, Effizienz einzelner Komponenten der Ladeinfrastruktur etc.) bei den Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten ganz oben auf der Agenda.

Ausblick

Während bei Dieselhybridbussen Erkenntnisse aus zum Teil mehr als fünf Jahren Betrieb vorliegen, steht der Einsatz batterieelektrischer Busse erst am Anfang. Folglich unterscheiden sich auch die Schwerpunkte bei der technischen Weiterentwicklung bis zur Marktreife bzw. die Bewertung der betrieblichen Einsatztauglichkeit. Dies ist bei der weiteren inhaltlichen Ausgestaltung der Arbeitsgruppe zu berücksichtigen.

Beim **Dieselhybrid** gilt es, die Energieeffizienz und die Verfügbarkeit weiter zu verbessern. Hier bieten das Energiemanagement und Nebenverbraucher wie Heizung und Klimatisierung Einsparpotentiale. Die dabei gewonnenen Erkenntnisse können anschließend auf den rein-elektrischen Bus übertragen werden. Weiter zu beobachten ist die Lebensdauer zentraler Komponenten wie des Energiespeichers, vor allem hinsichtlich möglicher alterungsabhängiger Einbußen bei der Leistungsfähigkeit und der Verfügbarkeit.

Seit Inkrafttreten der Euro VI Abgasnorm sind nur noch Fahrzeuge, die dieser Norm entsprechen, verfügbar. Vor diesem Hintergrund ist messtechnisch zu untersuchen, ob die derzeit verfügbaren Hybridbusse weiterhin vergleichbare Vorteile bei der Verringerung von Luftschadstoffen gegenüber konventionellen Dieselbussen aufweisen, wie es für die Euro V Fahrzeuge der Fall ist.

Voraussetzung für eine angemessene Technologiebewertung der **Elektrobusse** ist der Ausbau der Datenbasis. Mit der wachsenden Zahl an Fahrzeugen im Einsatz und ihrer zunehmenden Betriebsdauer wird dies durch eine Fortführung und eventuelle Ausweitung der Langzeiterfassung der Betriebsdaten dieser Busse, möglich. Im Mittelpunkt stehen dabei:

- die Optimierung der Komponenten und des Gesamtsystems in Bezug auf den Energiebedarf (z.B. Fahrantrieb, Nebenverbraucher, Ladevorgang) und die Verfügbarkeit des Gesamtsystems (Fahrzeug und Ladeinfrastruktur),
- konzeptionelle Fragen zur Energieversorgung auf der Strecke bzw. dem Betriebshof,
- die Standardisierung der Schnittstellen von Fahrzeug und Ladeinfrastruktur,
- die Bewertung der Übertragbarkeit der Erfahrungen von einzelnen Pilotlinien auf Linienbündel oder das Gesamtnetz,
- Untersuchungen zu den Auswirkungen der jeweiligen Einsatzkonzepte auf die Produktivität und Flexibilität beim Einsatz der E-Busse. Hier sind auch Störfallbetrachtungen (z. B. Ausfall Ladeinfrastruktur, Auswirkungen von Verspätungen) zu berücksichtigen.

- Neben übergeordneten konzeptionellen Fragen stehen die Verkehrsunternehmen vor konkreten betrieblichen Anforderungen beispielsweise zu:
- der Bereitstellung der benötigten Energie (einschließlich der Spitzenlast) auf den Betriebshöfen sowie ggf. auf der Linie,
- der Realisierung effizienter und technologiespezifischer Abläufe zur Versorgung und Wartung der E-Busse,
- der zweckmäßigen und ergonomischen Gestaltung und Ausstattung von Betriebshöfen und Werkstätten sowie
- der Erstellung und Umsetzung der Ausbildungskonzepte für die Mitarbeiter in der Werkstatt und im Fahrdienst.

Vor dem Hintergrund des meist ökologisch motivierten Einsatzes emissionsfreier Busse ist politisch zu klären, inwieweit in diesem Zusammenhang neben der betriebswirtschaftlichen Betrachtung auch die externen Umweltkosten berücksichtigt werden sollten.

Für eine umfassende und technologieoffene Bewertung innovativer Antriebe für Stadtbusse ist die Berücksichtigung weiterer Konzepte sinnvoll. Dies sind z. B. mit wasserstoffbetriebene Brennstoffzellenbusse oder Oberleitungshybridbusse. Aus methodischer Sicht sind auch die Bemessungsgrundlagen, z. B. eine einheitliche Definition der Fahrzeugverfügbarkeit, zu harmonisieren. Ebenso sollen weitere Aspekte wie z. B. die Verfügbarkeit der Ladeinfrastruktur miteinbezogen werden.

Damit können die Effekte der Förderprogramme zur Entwicklung und zum Einsatz innovativer Busse bewertet werden und Handlungsempfehlungen für zukünftige Förderprogramme bereitgestellt werden.

Vor dem Hintergrund der Diskussion zentraler Konzepte und Strategien wie die Mobilitäts- und Kraftstoffstrategie der Bundesregierung und das „Clean Power for Transport“ Paket der Europäischen Kommission kann mit Hilfe der Ergebnisse der AG der Beitrag innovativer Linienbusse zur Erreichung politischer Zielvorgaben wie z. B. zur Reduktion von Treibhausgasen herausgestellt werden. Legt man etwa das Ziel der Bundesregierung bis 2020 in Deutschland 1 Mio. E-Fahrzeuge in den Verkehr zu bringen, auf die Stadtbusflotte des VDV um, so ergibt sich ein Zielwert von rund 440 Bussen zur Erreichung des analogen Flottenanteils. Berücksichtigt man das heute bereits ca. 350 Hybridbusse im Linieneinsatz sind, zeigt dies beispielhaft die gute Eignung des ÖPNV als Leuchtturm für die Einführung innovativer Antriebe.

Die Vielzahl an offenen Forschungs- und Entwicklungsthemen verdeutlicht den Bedarf an weiteren Forschungsprojekten und die Notwendigkeit die Ergebnisse dieser Einzelergebnisse zusammenzuführen. Die Arbeitsgruppe „Innovative Antriebe Bus“ bietet dazu den geeigneten Rahmen. Alle Partner äußern zudem den Wunsch und das Interesse an der Fortführung der AG.

Die Bundesressorts BMVI und BMUB setzen ihr Engagement für innovative Antriebstechnologien über ihre Förderprogramme fort. Inhaltliche Schwerpunkte sind die Technologieentwicklung und Erprobung von rein-elektrischen Bussen (Batterie und Brennstoffzellen) zur mittelfristigen Umstellung des Busverkehrs auf komplett elektrische Systeme sowie die Beschaffung von Dieselhybrid- und Plug-In-Hybridbussen. So können weitere Impulse für ein An- bzw. Hochlaufen des Marktes für Linienbusse mit innovativen Antrieben gesetzt werden, die der Steigerung der Attraktivität des ÖPNV dienen und einen wichtigen Beitrag zum Umwelt- und Klimaschutz leisten.



>> 4 BERICHTE AUS DEN PROJEKTEN

In Ergänzung zu den Ergebnisdarstellungen der übergeordneten Begleitforschung der AG Innovative Antriebe Bus im Hauptteil des Berichts, werden im Folgenden Kurzberichte aus einzelnen Förderprojekten vorgestellt. Thematisch gegliedert wird ein Überblick über die Inhalte sowie, sofern verfügbar, erste Ergebnissen gegeben.

>> 4.1 PRAXISTAUGLICHKEIT UND EINSATZREIFE

Projekt FREE (Kasseler Verkehrs-Gesellschaft)

Ansprechpartner: Markus Kollig, Kasseler Verkehrs-Gesellschaft AG

Inhalt/Ziele

Im Zeitraum April 2013 bis April 2015 (24 Monate) testete die KVG in Kassel einen Elektrobus (Typ: Hersteller SOR mit 10,5 m Länge/technische Spezifikationen: 150 km Reichweite, 172 kWh Batteriekapazität; Dieselzusatzheizung) mit dem Ziel die Anforderungen des Linieneinsatzs und die Rahmenbedingungen der Implementierung zu bewerten. Ferner sollten erste Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen gegenüber der konventionellen Dieseltechnologie vorgenommen werden.

Grundprämisse im Projekt war die Umsetzung eines kostenminimalen Ansatzes. So wurden beispielsweise die Kosten für Ladeinfrastruktur möglichst gering gehalten und ein einfaches Ladegerät des Herstellers verwendet (Leistung: 400 V und 32 A). Die Hochvoltbatterie konnte damit in ca. 6 Stunden vollständig geladen werden. Auf der Strecke wurde keine Nachladung umgesetzt. Diesbezüglich spielte die Auswahl des passenden Einsatzbereiches abhängig von der Reichweitenreserve der Batterie eine wichtige Rolle. Wesentliche Auswahlkriterien des Einsatzbereiches waren: das Fahrgastaufkommen, die Fahrzeuggröße und der Kapazitätsbedarf sowie die Umlaufgestaltung (möglichst linienrein), Ausfallrisiko und eine schnelle Reaktionszeit bei Ausfall.

Linieneinsatz

Der Elektrobus kam auf zwei Linien (Linie 16 mit einer Umlauflänge von 12,8 km und Linie 29 mit 5,8 km) zum Einsatz. Inklusiv der Ein- und Aussetzfahrt erreichte der Bus eine Tagesleistung von 105 km (Linie 16) bzw. 86,3 km (Linie 29). Bei jedem Kurs der Linie 16 betrug die Höhendifferenz insgesamt 180 Meter. Die Dauer der Dienste betrug 7,5h bei beiden Linien. Die ersten Erfahrungen waren durchweg positiv, so dass der Bus zeitweise in einen Linienverbund mit einer Umlauflänge von 18,1 km bei einer Tagesleistung von ca.

205 km und ca. 12 h Dienst eingesetzt wurde. Wenige negative Erfahrungen beim Einsatz waren zumeist betriebliche Probleme und hatten keine technische Ursache (z. B. Fahrerbefürchtungen zu Reichweitenproblemen und Liegenbleiben). Diese Befürchtungen waren allerdings unbegründet. Der Bus blieb nicht auf der Strecke liegen.

Ergebnisse zur Praxistauglichkeit und Einsatzreife

In den 24 Einsatzmonaten legte der Bus insgesamt ca. 25.000 km zurück. Die durchschnittliche Verfügbarkeit des Fahrzeugs lag bei 85 %. Der Einsatz konnte nachweisen, dass der Betrieb im Liniennetz der KVG technisch möglich ist. Auch auf topografisch anspruchsvollen Linien und bei hohem Besetzungsgrad wurden alle Umläufe problemlos bewältigt. Ausfallzeiten können im Wesentlichen auf Probleme im Zusammenspiel von Fahrzeug und Ladegerät zurückgeführt werden. Erkenntnisse und Handlungsempfehlungen hinsichtlich der Praxistauglichkeit, die aus dem Einsatz abgeleitet werden können, sind die Notwendigkeit der Reduzierung technischer Experimente im Einsatz und die Definition einheitlicher Ladestandards unter Berücksichtigung ggf. vorhandener Ladeinfrastruktur.

Die betriebswirtschaftlichen Ergebnisse finden sich in Kapitel 4.4.



Projekt EMIL - Elektromobilität mittels induktiver Ladung (Braunschweiger Verkehrsgesellschaft)

Ansprechpartner: Frank Brandt, Braunschweiger Verkehrs-GmbH

Inhalt/Ziele

Im Rahmen des von der Braunschweiger Verkehrs-GmbH koordinierten Projekts „emil“ verfolgen die beteiligten Partner (BS Energy, Bombardier, TU Braunschweig) das Ziel die neue Feld der induktiven Energieübertragung für die Nutzung von Elektrobussen im ÖPNV weiterzuentwickeln und erstmals im realen Linienbetrieb umzusetzen. Hierzu soll die stark frequentierte Ringlinie 19 in Braunschweig dauerhaft als erste induktive E-Buslinie mit 200 kW Schnellladung rein elektrisch befahren werden um damit den Nachweis zu erbringen, dass ein technisch funktionierender, effizienter betrieblichen Einsatz von induktiv zu ladenden Batteriebusen im städtischen Linienverkehr machbar ist.

Linie M19

Die Braunschweiger Ringlinie M19 mit 12 km Länge und 25 Haltestellen verkehrt wochentags im 10-Minuten-Takt und befördert täglich im Schnitt über 6.000 Fahrgäste.

Technologie

Die berührungsfreie induktive Schnellladetechnik samt kleiner Bordbatterie mit geringem Systemgewicht ermöglicht während des Betriebes (sogenanntes ‚Opportunity Charge‘ bzw. Gelegenheitsladen) die Energieversorgung der Elektrobusse, ohne die Fahrzeuge für eine lange Ladezeit an eine Ladestation anzuschließen und somit dem Betrieb zu entziehen, d.h. es werden zusätzliche Umlaufzeiten, Fahrpersonal oder Fahrzeuge vermieden. Hierzu erfolgt die Ladung automatisch, sobald das Fahrzeug über dem Ladepunkt platziert ist.

Drei induktive Ladestationen wurden bisher realisiert: Im Busdepot der Verkehrs-AG, an der Haltestelle ‚Hamburger Straße‘ und an der Endhaltestelle der M19 am Braunschweiger Hauptbahnhof. Eine weitere Station ist am Amalienplatz bereits erstellt und wird Ende Januar 2016 in Betrieb genommen. Das kurze Zwischenladen an den Haltestellen ‚Hamburger Straße‘ und ‚Amalienplatz‘ wird nicht energetisch für die Linienfahrt benötigt, sondern erhöht die Lebensdauer der Ionen-Lithium Batterien über ein ausgeglicheneres Ladebild.



Abbildung 31: Errichtung Ladeinfrastruktur an der Haltestelle Amalienplatz

Das induktive Schnellladesystem kann über eine Versorgung mit 600 Volt Gleichspannung oder 400 bis 600 Volt Wechselspannung betrieben werden. Entsprechend wurden auf der Ringlinie (Hamburger Str.) und am Hauptbahnhof (Endpunkt) der Einbau der Ladepplatten samt Steuerungseinheiten über DC angebunden. Dort dienen beispielsweise die Straßenbahnfahrleitung und ein Straßenbahnunterwerk als Spannungsquelle. Am Depot und auf der Strecke (Amalienplatz) wird hingegen aus dem verfügbaren AC-Netz die erforderliche Energie eingespeist.

Für die Erprobung des Systems im Linienverkehr wurde zunächst ein 12 m E-Bus aufgebaut. Dieser ist seit März 2014 als Verstärker auf der M19 zwischen den Dieselgelenkbussen im Einsatz und liefert wichtige Daten und Erkenntnisse für den rein elektrischen Linienbetrieb auf der Ringlinie.

Auf Basis der gesammelten Erfahrungen wurden in einem zweiten Schritt die vier 18 m E-Gelenkbusse von Solaris gemeinsam mit Vossloh Kiepe und Bombardier aufgebaut. Sie werden elektrisch beheizt, verfügen über eine Vollklimatisierung und haben eine elektrische Türsteuerung.



Abbildung 32: Die 5 eMIL Busse mit induktiver Ladetechnologie

Ergebnisse zur Praxistauglichkeit und Einsatzreife

Im Dezember 2014 wurde der Linienverkehr mit den ersten Gelenkbussen aufgenommen. Während des Betriebes reicht die reguläre Wendezeit am Hauptbahnhof (ca. 12 Minuten) im Zusammenspiel mit den übrigen Zwischenladestationen aus, um die Batterie je Runde am Hauptbahnhof als zentrale Ladestation wieder voll aufzuladen. So wird die Vorgabe, Dieselbusse nahtlos zu ersetzen, ohne dabei den Fahrplan, die Linienlänge und die Standzeiten für die M19 relevant zu ändern, erfüllt.

Ein weiterer Vorteil der induktiven Ladetechnologie ist, dass sich die Nebenanlagen der unterirdisch im Haltestellenbereich verbauten Ladetechnik unauffällig und damit stadtgestalterisch ansprechend in die jeweilige Umgebung integrieren lassen. Als Resultat ergab sich in Braunschweig ein relativ unaufwendiges Genehmigungsverfahren.

Weitere Ergebnisse des Projektes finden sich im Kapitel 2.2.5 (Energieeffizienz).

Nächster Schritt ist der weitere Betrieb samt Ausbau des Systems Linie 19 mit 2 weiteren E-Gelenkbussen ab 2016/17, um die Linie komplett elektrisch anbieten zu können.

Neben der Realisierung der ersten Buslinie mit induktiver Schnellladung war außerdem die Konzeption und Umsetzung einer induktiven Ladung von Pkw Bestandteil der Schaufensteraktivitäten. Die Besonderheit ist dabei zunächst die Nutzung der zum Bus identischen Infrastruktur, die eine induktive Schnellladung mit rd. 20 kW ermöglicht. Dies bietet eine deutliche Nutzensteigerung zum derzeitigen Ladestandard von 3,6 kW für einen Flotteneinsatz. Die Ladeübertragung konnte bereits im Labor dargestellt werden (siehe Abbildung 33). Zum Abschluss des Schaufensters sollen Fahrten und Ladungen komplett im Echtbetrieb durchgeführt werden.



Abbildung 33: Induktive Ladung von Pkw im Labor

Projekt SEB - Schnellladesysteme für Elektrobusse im ÖPNV“ - Teilprojekt EDDA-Bus (Fraunhofer-Institut für Verkehrs- und Infrastruktursysteme (IVI))

Ansprechpartner: Dr. Thoralf Knotz, Fraunhofer (IVI)

Inhalt/Ziele

Das vom Bundesministerium für Bildung und Forschung unterstützte Projekt „SEB - EDDA-Bus“ hatte die Entwicklung von Kerntechnologien für schnellladefähige Batteriebusse zum Inhalt. Hierbei handelte es sich im Einzelnen um

- Ladestationen für Schnellladung
- ein Kontaktsystem für die Energieübertragung im Stand
- ein Verfahren für die automatisierte Kontaktierung mit sehr kurzer Vorbereitungszeit
- ein angepasstes Sicherheitskonzept
- ein Kommunikationskonzept zwischen Ladestation und Fahrzeug
- Batterien für hohe Ladeleistungen
- eine angepasste Traktionsausrüstung.

Beim gewählten Ladekonzept auf Basis der Gelegenheitsladung wird die elektrische Energie an Halte- bzw. Endhaltestellen einer Buslinie nachgeladen, um eine Reichweite entsprechend der Tagesfahrleistungen eines Busses zu gewährleisten.

Partner in diesem Projekt waren Fraunhofer-Institut für Verkehrs- und Infrastruktursysteme (IVI), Vossloh Kiepe GmbH, HOPPECKE Advanced Battery Technology GmbH, Schunk Bahn- und Industrietechnik GmbH, M & P Motion control and Power electronics GmbH und die Dresdner Verkehrsbetriebe AG.

Basierend auf einer eingehenden Analyse des Betriebsablaufs wurden zunächst die Anforderungen an schnellladefähige Batteriebusse und die zugehörige Ladeinfrastruktur erarbeitet. Darauf aufbauend wurden durch die beteiligten Industrieunternehmen die Kerntechnologien in Zusammenarbeit mit dem Fraunhofer IVI entwickelt und prototypisch umgesetzt.

Dem Fraunhofer IVI kam dabei die Rolle des Koordinators und Integrators der Technologien in die Testplattform zu. Des Weiteren wurde in enger Abstimmung mit den Partnern und dem TÜV Rheinland, der das Projekt von Anfang an aus dem Blickwinkel der Sicherheit begleitete, ein Sicherheits- und Kommunikationskonzept entwickelt.

Als Testplattform diente ein zum reinen Batteriebus umgebauter serieller Hybridbus des Fraunhofer IVI. Mit dessen Hilfe wurden die entwickelten Kerntechnologien sechs Monate auf verschiedenen Linien der Dresdner Verkehrsbetriebe AG im realen Fahrgastbetrieb einem eingehenden Test unterzogen.

Wichtige Merkmale der entwickelten Kerntechnologien werden nachfolgend aufgeführt.

Traktionsausrüstung (Vossloh Kiepe GmbH):

- Ertüchtigung der Traktionsausrüstung bzgl.
- Einbindung der Nachladefunktion
- Elektrifizierung von Nebenaggregaten (Luftpresser, Lenkhilfpumpe)
- Leistungserweiterung des Fahrzeugbordnetzes
- Sicherheits- und Energiemanagement

Batterien für hohe Ladeleistungen (HOPPECKE Advanced Battery Technology GmbH)

- Gesamtenergieinhalt: 86 kWh
- Ladeleistung: 450 kW
- Entladeleistung: >250 kW
- Zelltechnologie: Lithium-Polymer (Pouch)
- auf dem Fahrzeugdach integriert

Kontaktsystem für die Energieübertragung im Stand (Schunk Bahn- und Industrietechnik GmbH)

- 4-poliger Kontakt über dem Fahrzeug
- 750 VDC
- 500 A konst., 1000 A für 30 s
- Buspositionierung
- 100 cm Toleranz in Fahrtrichtung
- ca. 75 cm in Querrichtung
- extrem schnelle Kontaktherstellung (< 1 s)
- kompakte Bauweise

Ladestationen für Schnellladung (M & P Motion control and Power electronics GmbH)

- Doppelte Ladestation
- Anschluss an Gleichstrom, 10/20 kV, 400 VAC
- Schnellladestation mit 250 kW Ladeleistung
- Pulsadestation mit bis zu 700 kW Ladeleistung (interner Superkondensatorspeicher mit 2,0 kWh)
- minimale Kommunikation mit Bus per Bluetooth (keine Sicherheitsfunktion)

Bevor die Kerntechnologien auf dem Bus getestet werden konnten, mussten sie bei den Herstellern jeweils hausinterne Labor- und Funktionstests bestehen. Abschließend wurde das Gesamtsystem im realen Fahrgastdienst getestet.

Ergebnisse zur Praxistauglichkeit und Einsatzreife

Die Tests haben gezeigt, dass die Kerntechnologien für schnellladefähige Batteriebusse einen technischen Stand erreicht haben, auf dessen Basis die Nachladestrategie der Gelegenheitsladung als realistische und einsatzbereite Technologie im ÖPNV umgesetzt werden kann.

Die im Projekt entwickelten Kerntechnologien hatten während der Tests eine Gesamtverfügbarkeit von über 99 %.



Abbildung 34: Fahrzeug bei Funktionstest und im Linienbetrieb

Umfragen unter dem Fahrpersonal und Fahrgästen zeigte, dass insbesondere das ruckfreie Fahrverhalten sowie die geringe Geräuschbelastung großen Anklang fanden.

Projekt Inmod - Intermodaler öffentlicher Nahverkehr im ländlichen Raum

Ansprechpartner: Prof. Udo Onnen-Weber,
Kompetenzzentrums ländliche Mobilität Wismar

Inhalt/Ziele

Inmod ist ein Forschungsprojekt des Kompetenzzentrums Ländliche Mobilität an der Hochschule Wismar, welches sich im Rahmen eines Modellversuchs mit der Frage auseinandersetzt, inwiefern die Vernetzung von privatem und öffentlichem Verkehr zur Stabilisierung des entwicklungsgeschwächten Raumes beitragen kann. Das Vorhaben wurde dabei durch verschiedene universitäre Einrichtungen, drei Landkreise mit den zugehörigen Ämtern und Gemeinden und drei regionalen Busbetreibern begleitet und unterstützt.

Nicht nur der ländliche Raum der Flachländer sieht sich mit einem kaum noch existierenden öffentlichen Personennahverkehr mit Bussen konfrontiert. Verstreute Ortsteile erschweren den Zugang zu den wenigen verbleibenden Haltestellen und machen die Nutzung von Überlandbussen wenig attraktiv. In Mecklenburg-Vorpommern ist der ÖPNV mit Bussen bereits jetzt größtenteils auf den Schülerverkehr reduziert. Gleichzeitig ist der ländliche Raum durch den zunehmenden Freizeitverkehr immer stärker negativen Umweltwirkungen wie Lärm und Schadstoffen ausgesetzt. Ein verbesserter und nachhaltiger Zugang zum busbasierten ÖPNV für die Bewohner des ländlichen Mecklenburg-Vorpommerns war somit oberstes Ziel. Dabei kommt gerade der Vernetzung von Elektromobilität als nachhaltige Mobilitätslösung eine besondere Bedeutung zu.

Vorgehensweise

Die Umsetzung erfolgte auf drei Korridoren, die sich hinsichtlich ihrer raumstrukturellen Gegebenheiten unterscheiden und somit unterschiedliche Nutzergruppen ansprechen:

- Touristen: Landkreis Nordwestmecklenburg, Region Klützer Winkel zwischen Boltenhagen-Tarnewitz und dem Priwall
- Gelegenheitsfahrer: Landkreis Nordwestmecklenburg, Region Salzhaff zwischen Wismar ZOB und Klein Strömkendorf
- Berufspendler: Landkreis Vorpommern-Greifswald, Region Usedom zwischen Anklam und Heringsdorf

Im Modellprojekt wurden ein Batterie-Midibus der tschechischen Firma SOR und zwei MAN Solo-Dieselhybridbusse eingesetzt. Die Elektro- und Hybridbusse fahren in diesen drei Korridoren ohne bisher übliche Stichfahrten und in hohem Takt (1 bis 2 h). So konnten die

gefahrenen Kilometer und die benötigte Fahrzeit reduziert werden. Für Bewohner ohne direkten Zugang zu den Haltestellen wurden Elektrofahrräder zur Verfügung gestellt. In den Ortschaften und an den Haltestellen stehen gesicherte Abstell- und Ladeboxen. So werden die Elektrofahrräder als Zubringer in die ÖPNV-Kette integriert und ermöglichen die Weiterfahrt mit dem Bus (siehe Abbildung 35).

Untersuchungsgegenstand waren die Nutzakzeptanz, die Ökonomie eines solchen intermodalen ÖPNV und die Rechtsnormen. Der zuletzt genannte Punkt zielt auf die Frage ab, inwiefern nicht fahrgesteuerte Verkehrsmittel hinsichtlich Finanzierung und Haftung dem Personenbeförderungsgesetz PBefG unterliegen.



Abbildung 35: Nachhaltiger intermodaler ÖPNV – Dieselhybridbus und Pedelecs mit Ladestation

Ergebnisse zu Praxistauglichkeit und Einsatzreife

Die Buslinien waren mit 13.138 Fahrgästen in den drei Korridoren im Jahr 2014 überaus erfolgreich. Die durchschnittliche Streckenlänge pro Fahrt lag bei 6,4 km bei einer durchschnittlichen Fahrzeit von 24 Minuten. Alle drei Busse konnten während des Untersuchungszeitraums gute Verfügbarkeiten aufweisen. Die Geschwindigkeitsbegrenzung der Dieselhybridbusse auf 65 km/h stellt im Überlandverkehr eine betriebliche Limitierung dar. Der Batteriebus zeigte eine gute Eignung für den gewählten Einsatzkontext. Mit einer Schnellladestation hätte seine tägliche Einsatzdauer noch erhöht werden können.

Im strukturschwachen ländlichen Raum ist der ÖPNV ein quasi-intermodales System. Den Zugang dazu verantworten aber nicht die Nutzer selbst, sondern die Gemeinden. Fünf Gemeinden haben sich nach Projektende für die Übernahme des Zubringersystems mit

Elektrofahrrädern engagiert. Inmod hat gezeigt, dass Multimodalität funktionieren kann und erfolgsversprechend ist. Bis ein solches System aber flächendeckend in den ÖPNV strukturschwacher Regionen integriert werden kann, müssen weitere Untersuchungen durchgeführt werden.

>> 4.2 ENERGIEEFFIZIENZ/KRAFTSTOFFVERBRAUCH

Projekt SEB - Schnellladesysteme für Elektrobusse im ÖPNV“ - Teilprojekt EDDA-Bus (Fraunhofer IVI)

Ergebnisse zur Energieeffizienz

Die Inhalte und Ziele des Projektes wurden bereits in Kapitel 4.1 vorgestellt. Bezüglich der Energieeffizienz wurden folgende Beobachtungen gemacht: Entgegen der ursprünglichen Erwartungen verbrauchte der EDDA-Bus bei den Tests im Fahrgastdienst von November 2014 bis April 2015 lediglich zwischen 1,19 und 1,25 kWh/km (busseitig ab Stromabnehmer gemessen), wobei anzumerken ist, dass das Fahrzeug mit einer Dieselheizung ausgerüstet ist. Für einen 14,1 km langen Rundkurs waren daher lediglich 4,5 statt der erwarteten 6 min. Ladezeit notwendig. Für einen zweiten Rundkurs auf der topografisch anspruchsvollen Strecke zwischen Dresden-Gruna und Dresden-Bühlau mit einer Gesamtlänge von 19,6 km konnte die Ladezeit auf unter 6 min gedrückt werden.

Die Ladestationen wiesen während der Tests einen Wirkungsgrad von etwa 94,7% auf (gemessen zwischen Netzanschluss und Batterieklemme).

Projekt E-Bus Berlin (Berliner Verkehrsgesellschaft, BVG)

Ansprechpartner: Alexander Kunith, TU Berlin

Inhalt/Ziele

Im Projekt E-Bus Berlin werden 4 Solaris 12 m Solo-Busse rein elektrisch mit einer 90 kWh Batterie von Bombardier auf der 6,1 km langen Linie 204 betrieben. Antrieb und Hochvolt-elektronik stammen von Vossloh-Kiepe. Die induktive Ladung findet mit bis zu 200 kW an den Endhaltestellen statt. Die Ladetechnik wird von Bombardier geliefert. Die wissenschaftliche Begleitung übernimmt das Fachgebiet „Methoden der Produktentwicklung und Mechatronik“ der Technischen Universität Berlin. Die TU ist ferner für die Errichtung und den Betrieb einer der beiden zuständig.

Ein Ziel des Projektes ist die Analyse der Fahrstrecke (Aufzeichnung von Fahrprofil, Fahrgastaufkommen, Haltezeiten) und die Bewertung der Praxistauglichkeit und Einsatzreife. Hinsichtlich der Ladetechnologie werden Verfügbarkeitsrisiken und Optimierungsmaßnahmen untersucht.

Die Berechnung des Energieverbrauchs wird mit Hilfe eines modular aufgebauten, energetischen Simulationsmodells (Batteriesystem, Antriebsstrang, Klimasystem) durchgeführt, das auf Basis eines Fahrprofils und der klimatischen Randbedingungen den Energieverbrauch berechnet.

Zur Erfassung realer Verbrauchsdaten findet ein Datenmonitoring der Verbrauchsdaten statt. Die Verbrauchsdaten werden gemeinsam mit den Betriebsdaten der übergeordneten Begleitforschung im Rahmen der AG Bus zur Verfügung gestellt. Zusätzlich wurde einer der vier Busse als Messbus ausgestattet, der eine besonders detaillierte Datenerfassung gestattet. Hiermit ist eine Validierung der Simulationsmodelle des Antriebsstrangs sowie des Klimasystems geplant.

In Summe wird im Rahmen des Projekts eine systematische technisch-wirtschaftliche Gesamtbewertung durchgeführt, bei der Machbarkeit und Vorteilhaftigkeit der technischen Lösungen bewertet und mit alternativen Konzepten verglichen werden.

Ergebnisse zur Energieeffizienz

Da der Linienbetrieb erst im September 2015 begonnen hat, liegen aktuell noch keine konkreten Ergebnisse aus dem bis September 2016 laufenden Projekt vor. Die Bereitstellung der Verbrauchs- und Betriebsdaten für die übergeordnete Begleitforschung läuft bereits.



Projekt PRIMOVE Mannheim

Ansprechpartner: Kilian Berthold (Karlsruher Institut für Technologie (KIT))

Inhalt/Ziele

Das Institut für Fahrzeugsystemtechnik (FAST) am Karlsruher Institut für Technologie (KIT) begleitet den Prozess der Transformation der Mannheimer Dieselbus-Linie 63 in eine E-Bus-Linie wissenschaftlich durch den Aufbau eines modularen und validierten Simulationstools. Dies soll die zukünftige Auslegung sowie Optimierung von E-Bussystemen, bestehend aus Fahrzeug, Betrieb und Infrastruktur, durch virtuelle Testfahrten ermöglichen.

Die durch das KIT entwickelte Simulationsumgebung zielt darauf ab, die den elektrischen Busbetrieb beeinflussenden Inputgrößen möglichst vielfältig, detailliert, flexibel und realitätsnah abzubilden. Hierbei rückt besonders die Abbildung des Betriebs- und Verkehrseinflusses in den Fokus. Unter Einsatz verschiedener für den jeweiligen Systembestandteil besonders geeigneter Softwarelösungen wird ein Gesamtsystem modelliert und simuliert. So werden eine große Modularität, Erweiterbarkeit und Parametervariationen ermöglicht, die sich nicht nur auf die Busanwendung beschränken.

Basierend auf der durch das KIT erarbeiteten virtuellen Abbildung des E-Busbetriebs, sollen in der Folge Untersuchungen zu Wirkungsgraden und Energiemanagement, Worst-Case-Szenarien im Betrieb oder auch Wirtschaftlichkeits- sowie Emissionsbetrachtungen durchgeführt werden. Hieraus lässt sich, neben technischen Optimierungen, ein Handlungsleitfaden zur Elektrifizierung weiterer Buslinien und eines gesamten städtischen Busnetzes erstellen.

Zur Validierung der erarbeiteten Softwaremodelle führt das KIT umfangreiche Messungen auf den in Betrieb genommenen E-Bussen durch.

Vorgehensweise

Der wesentliche Grundsatz der Struktur des Gesamtmodells liegt darin, das Fahrzeug E-Bus nicht isoliert zu betrachten. Der Betrieb eines Stadtbusses hängt direkt von den ihm vorgegebenen Umweltbedingungen ab, innerhalb derer er sich bewegt. Entsprechend lassen sich die technischen Teilsysteme sowie das Gesamtfahrzeug nur dann detailliert untersuchen und optimieren, wenn es gelingt, die sie von außen beeinflussenden Faktoren möglichst realitätsnah abzubilden. Im Rahmen des Simulationsmodells erfolgt daher neben der Modellierung des Fahrzeugs auch eine tiefgreifende Modellierung des dazugehörigen Betriebs und der Infrastruktur. Hierbei wird das Ziel verfolgt, für die Modellbildung eines jeden der drei Teilsysteme, die jeweils am besten geeignete Softwarelösung zu wählen und das Gesamtsystem als Co-Simulation zu simulieren. Nachfolgende Abbildung stellt die Struktur des Gesamtsystems und dessen Softwareabbildung dar.

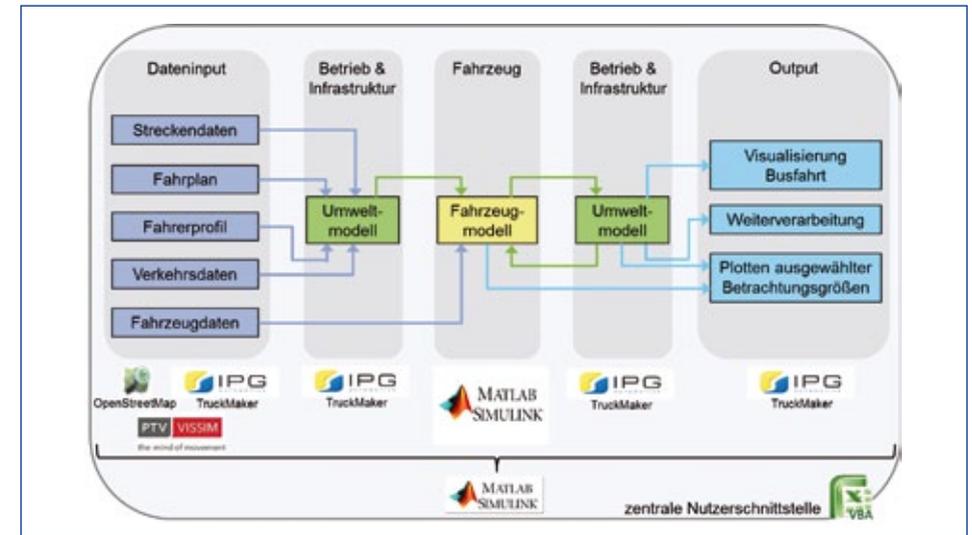


Abbildung 36: Struktur des Simulationsmodells zur Abbildung des Gesamtsystems

Basierend auf der Softwareumgebung lassen sich im Rahmen virtueller Dauertests verschiedene (Norm-) Fahrzyklen, Topologien, variierende Temperaturen, Ladedauern, Lastkurven des Energieversorgungsnetzes, Alterungseffekte der Batterie, Regelungsstrategien für Nebenverbraucher, Auswirkungen von Streckenänderungen, unterschiedlichen Verkehrszuständen oder Fahreigenschaften testen. Mit den hieraus gewonnenen Erkenntnissen ergeben sich vielfältige Optimierungsansätze auf Komponenten-, Fahrzeug-, Infrastruktur- oder Betriebsebene mit dem Ziel eines verbesserten Energiemanagements. So lassen sich die Treiber des Energiebedarfs identifizieren und daraus abgeleitet zukünftig etwa Nebenverbraucher energieeffizienter ansteuern. Auch wird die Dimensionierung des Akkus vereinfacht. Ermöglicht werden des Weiteren Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen, Energiefluss- und Emissionsvergleiche verschiedener Antriebskonzepte (verbrennungsmotorisch, elektrisch, hybrid). Im Kontext der möglichen Einbindung einer Verkehrssimulationssoftware, lässt sich die Interaktion des Busses und dessen Fahrer mit dem Straßenverkehr sowie der Verkehrsleittechnik, im Sinne der Energie- und Zeiteffizienz, durch Ansätze wie Bus-to-X-Kommunikation oder aktives Fahrercoaching optimieren.

Von grundlegendem Interesse ist darüber hinaus die Verwendung der ermittelten Simulationsergebnisse zur Auslegung einer Buslinie oder eines gesamten städtischen Busnetzes für elektrisches Fahren. So ist der in verschiedenen Szenarien ermittelte, durchschnittliche Energiebedarf auf der Fahrt zwischen den einzelnen Haltestellen eine wesentliche Inputgröße für die kostenminimale Konfiguration des Baus von Ladepunkten in einem stadtweiten Busnetz und für die E-Fahrzeugkonfiguration. Durch die Übertragbarkeit der Simulation auf diverse Ladetechnologien und andere Fahrzeuggattungen, lässt sich beispielsweise auch die Mitnutzung der Bus-Ladeinfrastruktur durch weitere urbane Nutzfahrzeuge wie Kehrmaschinen, Lieferlastwagen oder Müllfahrzeuge untersuchen.

Nach erfolgreicher Inbetriebnahme der Strecke werden die Simulationsergebnisse durch Messungen verifiziert, welche durch das KIT ermittelt, aufbereitet und analysiert werden. Die Ergebnisse werden zum einen genutzt, um die Simulation weiter zu optimieren und zum anderen direkt in den Probetrieb zurückgegeben, um die Weiterentwicklung des praktischen E-Bus-Betriebs zu unterstützen.

Ergebnisse zur Energieeffizienz

Da die Messungen auf dem Fahrzeug noch ausstehen, liegen noch keine Ergebnisse vor. Erst durch die Messungen werden Realitäts-Parameter zur Verfügung stehen, die der Softwareumgebung übergeben werden können. Wenn durch die Softwaresimulation dann die gleichen Ergebnisse ermittelt werden, wie in der Realität gemessen wurden, ist das der Beweis, dass die Ergebnisse der virtuellen Abbildung auf andere virtuelle Testfälle übertragbar sind und sie der Realität entsprechen.



Projekt Elektrobus-Linie 79 (Dresdner Verkehrsbetriebe, DVB)

Ansprechpartner: Alexander Bunzel, TU Dresden

Inhalt/Ziele

Das Projekt „Elektrobus-Linie 79“ ist eines von rund 40 Projekten im Schaufenster Bayern-Sachsen ELEKTROMOBILITÄT VERBINDET. Die Partner im Verbundprojekt sind die Dresdner Verkehrsbetriebe AG (DVB) sowie die Technische Universität Dresden, Lehrstuhl Fahrzeugmechatronik (FZM). Dabei zeichnete sich die DVB für die Ausschreibung und den Linienbetrieb des vollelektrischen Fahrzeugs verantwortlich. Neben der technischen Unterstützung im Betrieb, lagen die Inhalte der Auslegung von Traktionsbatterie und Ladeschnittstelle sowie die Optimierung der Ladestrategie für eine möglichst lange Speicherlebensdauer auf Seiten des Lehrstuhls FZM.

Ziel des Förderprojektes ist die Elektrifizierung einer Quartierbuslinie in Dresden, welche die Stadtteile Mickten und Übigau miteinander verbindet. Die Linie 79 wurde dabei gezielt gewählt, da folgende Situationen vorlagen:

- Kurze Umlaufstrecke mit ca. 5,4 km Gesamtlänge (siehe Abbildung 37),
- rund 16 min Fahrzeit bei 20 min Taktung, Bedienung durch ein Fahrzeug möglich,
- flache Topologie (SORT-2-Charakter),
- Endhaltestelle/Wendepunkt kreuzt weitere Haltestellen von Bus und Straßenbahn,
- geringe Distanz bis zum Depot.



Abbildung 37: Streckenumlauf Linie 79

Ursprünglich wurde die Linie durch einen verbrennungsmotorisch-betriebenen Mercedes Benz Sprinter mit Personenaufbau bedient. Durch die positive Entwicklung der angrenzenden Stadtteile reichte die Kapazität des Fahrzeugs nicht mehr aus, sodass die Gefäßgröße entsprechend anzupassen war. Neben Vorgaben bezüglich des Fahrzeugs gab es ebenfalls für die Ladeperipherie betriebsbedingte Kriterien. So sollte am Wendepunkt eine Hochstromladestation errichtet werden, die einen Nachladevorgang bei gleichzeitigem Passagierwechsel realisiert. Der elektrische Anschluss sollte am vorhandenen Gleichstrom (DC) - Straßenbahnstromnetz erfolgen. Dieser unterliegt, bedingt durch Rekuperationsvorgänge der Straßenbahnen, starken Spannungsschwankungen. Zur Steigerung der Flexibilität sollte zudem ein weiteres Ladegerät für Nachladevorgänge im Depot zur Verfügung stehen.

Prinzipiell wären für die Projektumsetzung der Linie 79 sowohl konduktive als auch induktive Hochstromnachladung realisierbar gewesen, jedoch entschied man sich aus der Erfahrung der DVB aus vorangegangenen Projekten für die konduktive Nachladung. Aus den Vorüberlegungen gingen folgende, real ermittelte Daten hervor: Linieninformationen, wie Fahrzeit, Wendezeit, Rüstzeit, Verspätungen, Geschwindigkeitsverlauf, Haltestellenabstände, Haltestellenaufenthalt, Fahrgastzahlen sowie das Temperaturniveau im Fahrzeuginnenen.

Basierend auf den Messwerten konnten detailliertere Berechnungen zum Energiebedarf des Gesamtfahrzeugs erfolgen. Hier ergab eine Abschätzung einen Verbrauch von etwa 1,13 bis 1,77 kWh/km (fahrzeugseitig). Hinzu kommt eine gewisse Reserve für die Klimatisierung von Fahrerarbeitsplatz und Fahrgastinnenraum an besonders warmen oder kalten Tagen.



Abbildung 38: a) Solaris Urbino 12 Electric



b) Verbauort Traktionsbatterie (www.dvb.de)

Im Verlauf des Projektes entschied man sich während einer europaweiten Ausschreibung für die Beschaffung eines 3-türigen Solaris Urbino 12 Electric (siehe Abbildung 38 a).

Die Ladeschnittstelle für die Hochstromladung am Wendepunkt wird durch einen überdacht montierten Pantografen der Firma Schunk realisiert. Im Depot kontaktiert das Fahrzeug das mobile Ladegerät per Combo-2-Gleichstrom-Ladestecker.

Die Traktionsbatterie wurde in Bezug auf die Randbedingungen der Linie 79 sehr groß ausgewählt. Sie ist modular aufgebaut, besteht aus insgesamt 5 Packs mit einem Energieinhalt von je 40 kWh. Die Modularität ermöglicht die Variation der verbauten Packs, d. h. das Fahrzeug kann theoretisch mit 3, 4 oder 5 verbauten Batteriemodulen betrieben werden. Als Verbauorte sind sowohl das Dach, als auch das Heck des Fahrzeugs gewählt worden. Insgesamt bestehen die 200 kWh Traktionsbatterie aus 3120 einzelnen, miteinander verschalteten Lithium-Eisenphosphat-Zellen. In der Abbildung 39 b ist der heckseitige Verbau dargestellt.

Ausgerüstet mit Messtechnik zur Erfassung von GPS-, Flottenmanagementsystem (FMS)-, Batteriemanagementsystem (BMS)-Parameter, Linien- und Fahrgastanzahlinformationen (teilweise) konnte das Fahrzeug am 17.06.2015 offiziell den Linienbetrieb auf der Buslinie 79 aufnehmen. Insgesamt hat das Fahrzeug bereits über 30.000 km absolviert (Stand 12/2015).

Ergebnisse zur Energieeffizienz

Ende 2014, Anfang 2015 wurde am Dreyßigplatz die Musterhaltestelle mit Ladestation errichtet. Es handelt sich dabei um eine behindertengerechte Ausführung mit Fahrgastunterstand und dynamischer Fahrgastinformation. Zusätzlich verfügt die Haltestelle über eine Positionierunterstützung für den Fahrer und den Dresdner Combibord. In Abbildung 40 ist der Wendepunkt vor und nach dem Umbau zu sehen.

Um die Speisung aus dem Gleichstrom (DC) - Bahnstromnetz realisieren zu können, musste das Hochstromladegerät entsprechend ausgelegt werden. Auf der Eingangsseite treten Spannungsschwankungen von 500 V bis 1000 V auf. Maximal kann eine Ladeleistung von 200 kW übertragen werden, der Wirkungsgrad liegt bei etwa 93 %.



a) vorher

b) nachher

Abbildung 39: Musterhaltestelle mit Ladestation Dreyßigplatz (www.dvb.de)

Als Bindeglied zwischen Fahrzeug und Ladestation arbeitet ein Dachstromabnehmer. Dieser wurde 5-polig ausgelegt und orientiert sich damit an der DIN EN 61851, der aktuell für Pkw geltenden Norm. Eine Darstellung des Aufbaus in Theorie und Praxis ist der Abbildung 40 zu entnehmen. In der bisher 5-monatigen Nutzungszeit hatte die Ladeschnittstelle eine Verfügbarkeit von 99,997 %.



a) Prinzipskizze

b) Auf dem Fahrzeug

Abbildung 40: Ladeschnittstelle (www.schunk-sbi.com)

Die Vorgabe der maximalen Ladeleistung betrug 200 kW. Dies konnte im Linieneinsatz bisher auch erfolgreich realisiert werden. Jedoch bleibt die Ladeleistung nicht konstant bei diesem hohen Wert, sondern wechselt definiert auf einen geringeren Wert (ca. 180 kW) und wieder zurück. Dieses Toggeln wird von der Steuerung des Ladegeräts vorgegeben und ausgeführt.

Größere Probleme bereiteten zunächst die starken Spannungsschwankungen auf der Eingangsseite. Dadurch kam es zu Ausfällen der Ladestation und dementsprechend zu einer sinkenden Verfügbarkeit. Eine genaue Aufschlüsselung ist der Tabelle 6 zu entnehmen.

Tabelle 6: Verfügbarkeit Hochstromladegerät Dreyßigplatz

Monat	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov
Verfügbarkeit (%)	88	95	100	99	94	68

Die Auswertung der über mehrere Monate aufgenommenen Betriebsdaten liefert folgende erste Erkenntnisse

- der nutzbare Energieinhalt der Traktionsbatterie liegt bei etwa 170 kWh.
- die mit maximal 3 Minuten je Umlauf angenommene Ladedauer am Wendepunkt hat sich aufgrund einer veränderten Taktung auf den Tag verteilt auf etwa 6 Minuten erhöht. Zur Mittagszeit wird beispielsweise nun 30-minütig gefahren. Im Zusammenspiel mit der sehr groß dimensionierten Traktionsbatterie, werden in der Folge von den 41 möglichen Ladevorgängen pro Linientag lediglich etwas weniger als 25 von den Fahrern wahrgenommen. Dies liegt teilweise an Positionierfehlern (Fahrzeug zu Ladehaube), in der Mehrheit wird jedoch keine Notwendigkeit zum Ladevorgang gesehen. Dadurch ergibt sich über den Tag ein unregelmäßiger SOC-Verlauf (State of Charge - Ladezustand), welcher beispielhaft in Abbildung 41 zu sehen ist.

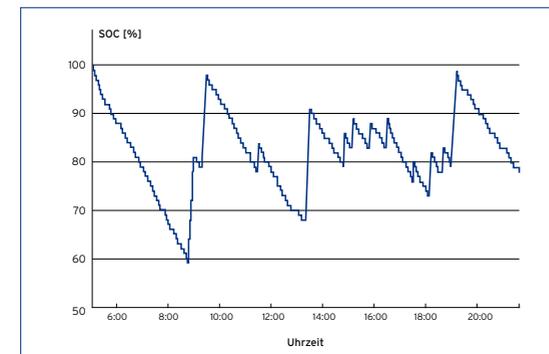


Abbildung 41: SOC-Verlauf Traktionsbatterie über einen Tag

Der Energieverbrauch je Kilometer liegt bisher im angenommenen Rahmen von 1,2 bis 1,9 kWh (Fahrzeugseitig, ohne Ladeverluste). Allerdings stehen zum jetzigen Zeitpunkt noch Einsätze bei sehr kalten Umgebungsbedingungen, wie unter -10°C , aus.

Ausblick

Parallel zum Linieneinsatz des Fahrzeugs erfolgten beim FZM Laboruntersuchungen zu Alterungseinflüssen der Batteriezellen. Anhand der Ergebnisse soll dem Fahrer eine visuelle Empfehlung gegeben werden, wann ein Ladevorgang sinnvoll ist. Zusätzlich soll der maximale Ladestrom von aktuell etwa 280 Ampere prädiktiv auf einen geringeren Wert limitiert werden. Die Algorithmen zur Berechnung des Stromwertes werden auf dem bereits installierten FZM-Steuerrechner vorgenommen. Weiterhin sollen zukünftig ein oder mehrere Batteriestränge aus dem Fahrzeug entnommen werden, um die Auswirkungen auf das Gesamtfahrzeug betrachten zu können.

Projekt Pilotlinie 64 (Dresdner Verkehrsbetriebe, DVB)

Ansprechpartner: Mike Liebers, Jörn Kiele

Ziele/Inhalt

Das Projekt „Pilotlinie 64“ verfolgt zwei Ansätze zur Steigerung der Effizienz von Hybridbussen: Eine bessere Nutzung der im Bus vorhandenen Energie sowie die Verringerung der Fahrzeugmasse. Die Energieeinsparung, vor allem bei Heizung, Lüftung und Klima soll im Folgenden zu längeren rein elektrisch zurückgelegten Strecken führen.

Wissenschaftler der TU Dresden haben gemeinsam mit den Dresdner Verkehrsbetrieben zwei neue Ansätze entwickelt, die auf der Pilotlinie 64 zwischen Reick und Kaditz ab 2016 zum Einsatz kommen sollen:

Das Institut für Automobiltechnik Dresden (IAD) der TU Dresden widmet sich der Erschließung von Energiesparpotenzialen der Nebenverbraucher des Hybridbusses, denn der untersuchte Hybridbus benötigt bis zu 7-Mal mehr Heizöl gegenüber einem konventionellen Bus auf der Linie 64. Im August 2015 wurden zwei intelligente bidirektionale Luft/Luft-Wärmepumpen der Firma Spheros als Klimaanlage auf dem Bus installiert. Anders als bisher, ist eine Zusatzheizung mit Heizöl dann nur noch bei sehr tiefen Temperaturen notwendig.

Im Sommer wirkt die Wärmepumpe als Klimaanlage. Die neue Temperaturregelung stellt die Innenraumtemperatur in Abhängigkeit von der Außentemperatur situativ ein, umweltfreundlich, elektrisch und bei Bedarf abschaltbar. Die Wissenschaftler rechnen allein beim Heizöl mit einer Einsparung zwischen 10 und 20%.

Der Hybridbus wurde mit 117 Sensoren ausgestattet. Diese erfassen seit November 2014 im Linienbetrieb auf der Pilotlinie 64 Daten wie Temperaturen, Drücke, Durchflüsse, Ströme, Spannungen und Helligkeiten. Auf Basis der gesammelten Sensordaten wurde ein linienbezogenes Energiemanagement erarbeitet. Die Software erkennt beispielsweise über ein Fahrgastzählsystem die Zahl der Fahrgäste im Bus und schaltet die Innenraumheizung ab, wenn sie nicht benötigt wird. Durch die ermittelten Daten kennt die Software die Strecke und denkt voraus. Zum Beispiel weiß das System genau, wann ein Gefälle mit hohem elektrischem Nachladepotenzial durch Energierückgewinnung befahren wird. Das Energiemanagementsystem wird zunächst bis zum Sommer 2016 getestet und ständig weiterentwickelt.

Ein weiteres Sparpotential wird dem Gewicht der Busse beigemessen. Um Gewicht zu sparen und so die elektrische Reichweite zu erhöhen, haben sich die Wissenschaftler des Instituts für Leichtbau und Kunststofftechnik (ILK) der TU Dresden die Räder des Hybridbusses vorgenommen. Da ein Gelenkbus zehn Räder besitzt, ergibt sich ein entsprechend hohes Einsparpotential. Basis für die Gewichtseinsparung bildet eine hocheffiziente hybride Mischbauweise aus kohlenstofffaserverstärkten Kunststoffen für das Felgenbett und Aluminium für den Radstern. Die hybride Felge besteht etwa zur Hälfte aus Carbon und zur Hälfte aus Aluminium und ist mit unter 20 Kilogramm mehr als 50 Prozent leichter als eine herkömmliche Stahlfelge. Das führt zu einer Gewichtsreduktion für den gesamten Bus von rund 250 Kilogramm.

Im Moment befinden sich die ersten Prototypen der Verbundfelge zu Belastungs-, Festigkeits- und Ermüdungstests auf den Prüfständen. Bis Mitte des nächsten Jahres sollen alle erforderlichen Genehmigungen und die TÜV-Zulassung eingeholt sein, so dass das Leichtbaurad für den Pilotbetrieb auf der Linie 64 zum Einsatz kommen kann.

Ergebnisse zur Energieeffizienz

Das Untersuchungsfahrzeug wurde umfangreich mit Messtechnik ausgestattet, vernetzt und im Linienbetrieb auf der Linie 64 begleitet. Für die Übertragung der Messdaten wurde eine Echtzeit-Telemetrieplattform entwickelt.

Eine bidirektionale Wärmepumpenanlage, welche im Winter effizient heizen und im Sommer wie gewohnt kühlen kann, wurde auf dem Fahrzeug installiert und ersetzt somit die konventionelle Dachklimaanlage. Die Entwicklung und Erprobung einer zum Patent angemeldeten Preformingtechnologie für eine taktzeitoptimierte Fertigungskette von Leichtbaurädern wurde durchgeführt. Im Rahmen der Entwicklung fand eine Bewertung von 20 Rad-Varianten anhand einer Nutzwertanalyse gemäß VDI 2225 und Umsetzung eines Hybrid-Leichtbaurads mit metallischem Radstern und CFK-Felgenbett statt.

Nachfolgend sind einige Beispiele für die eingesetzten Maßnahmen zur technischen Optimierung aufgeführt:



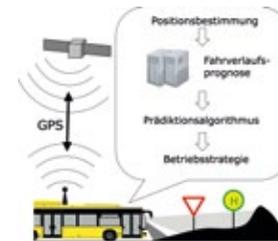
Abgaswärmetauscher

Die Integration von parallel geschalteten Abgaswärmetauschern soll den Abgasstrom des Verbrennungsmotors als Wärmequelle erschließen. Die Einbindung in den Heizkreislauf des Fahrzeugs erfolgt über den Warmwasservorratsbehälter und steigert die Vorlauftemperatur der mit Heizöl betriebenen Zuheizter. Folglich soll deren Zuschalthäufigkeit und damit der Heizölverbrauch gesenkt werden.



Erweitertes Druckluftsystem

Der elektrische Druckluftkompressor versorgt über verschiedene Druckluftkreisläufe die Bremsen, die Türmechanismen und auch die Niveauregulierung des Hybridbusses. Die Erweiterung des Systems um einem schaltbaren, pneumatischen Speicher soll überschüssige Bremsenergie im Linienbetrieb effizient speichern.



Vorausschauendes Energiemanagement

Die Nebenverbraucher und Heizungskomponenten werden über ein vorausschauendes regelbasiertes Energiemanagement für künftige Leistungsanforderungen konditioniert. Das dafür notwendige Streckenmodell wurde auf Basis von Messdaten erstellt, welche seit 10/2014 im Linienbetrieb auf der Linie 64 aufgezeichnet wurden.



Konstruktion und Simulation

In der Konzeptphase wurde eine Vielzahl an Lösungsmöglichkeiten für ein geeignetes Leichtbaurad untersucht. Es wurden sowohl monolithische CFK-Räder als auch hybride Räder aus unterschiedlichen Werkstoffkombinationen und der dazugehörigen Verbindungstechnik evaluiert. Parallel wurden alle wesentlichen mechanischen Lastanforderungen mit Hilfe numerischer Simulationsmethoden für die Vorzugsentwürfe abgesichert.

Weitere im Projekt untersuchte und implementierte Maßnahmen zur Steigerung der Energieeffizienz umfassen:

- Luftwand-Anlage zur Reduzierung des Wärmeverlusts im Fahrgastraum
- Niedertemperatur-Heizstrahler um Wärmeverluste durch Auswände und offene Türen im Haltestellenbereich weiter zu vermindern
- Akzeptanzuntersuchung von optischen u. haptischen Fahrerunterstützungsfunktionen
- Adaptive LED-Beleuchtung zur Reduzierung des Energiebedarfs der elektrischen Nebenverbraucher
- Echtzeitlemetrie zur Erfassung Position, Liniencharakteristik, Fahrgastnachfrage und on board Datenverarbeitung und -austausch mit Messdatenserver
- Erarbeitung durchgängige automatisierbare Fertigungskette und Prüfung Leichtbaufelge

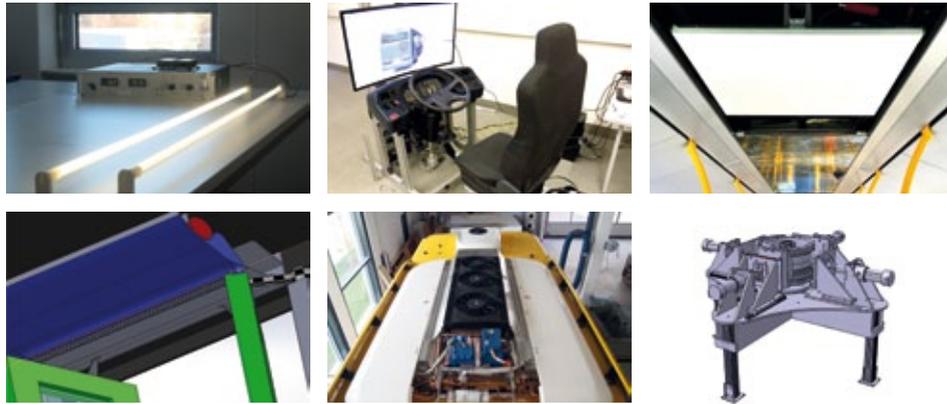


Abbildung 42: Eindrücke und Übersicht der weiteren technischen Optimierungsmaßnahmen

Projekt emil - Elektromobilität mittels induktiver Ladung (Braunschweiger Verkehrsgesellschaft)

Die Inhalte und Ziele des Projektes wurden bereits in Kapitel 4.1.

Ergebnisse zur Energieeffizienz

Die Energieverbräuche der Batteriebusse liegen derzeit für das Solofahrzeug bei \varnothing 1,67 kWh/km (Zeitraum Feb. bis Dez. 2015, Bandbreite 1,4 bis 1,9 kWh/km) und die Gelenkbusse bei \varnothing 2,7 kWh/km (Zeitraum Feb. bis Dez. 2015, Bandbreite 2,3 bis 3,1 kWh/km).

Im Projekt emil sind zur Ermittlung der Ladeeffizienz dezidierte Messuntersuchungen von den Projektpartnern vorgenommen worden. Hierzu hat die Physikalische-Technische Bundesanstalt Braunschweig als Projektpartner im Rahmen der Begleitforschungsaktivitäten folgende Arbeiten durchgeführt:

- Analyse des induktiven Energieübertragungssystems hinsichtlich der Zweckmäßigkeit des Messortes
- Aufbau einer mobilen Messeinrichtung unter Verwendung auf nationale Normale rückgeführter Sensor- und Leistungsmessbaugruppen
- Bestimmung der Energieverluste bei der induktiven Energieübertragung

Gemäß des in Abbildung 43 dargestellten Messaufbaus im Bus-Depot der Braunschweiger Verkehrs-GmbH wurde die Aufnahme der Messwerte vorgenommen.

Messpunkt 1 wurde aus dem Grunde gewählt, da so die Verluste die durch die Verkettung von Gleichrichtung, Wechselrichtung induktiver Übertragung und anschließender erneuter Gleichrichtung mit erfasst werden können. Messpunkt 5 liegt noch vor dem Abgang des Bordnetzes und erfasst so die gesamte übertragene Energie bevor sie sich ins Bordnetz und ins Batteriesystem verzweigt. Der Wirkungsgrad wurde aus den Momentanleistungen zu den jeweiligen Zeitpunkten berechnet. Die gemessenen Wirkleistungen und die zugehörigen errechneten Wirkungsgrade sind in Abbildung 44 abgebildet. Es ist zu erkennen, dass der Wirkungsgrad der Energieübertragung mit fallender Leistung leicht zunimmt. Während der dargestellten Messung betrug der durchschnittliche Wirkungsgrad 89,5%. Im dargestellten Fall wurde die Messung an der Ladestation im Betriebshof durchgeführt. Diese wird mit Wechselstrom gespeist. Die Ladestationen mit Gleichstrom-Einspeisung zeigen laut TU Braunschweig einen nochmals etwas besseren Wirkungsgrad (bis zu 92,5%).

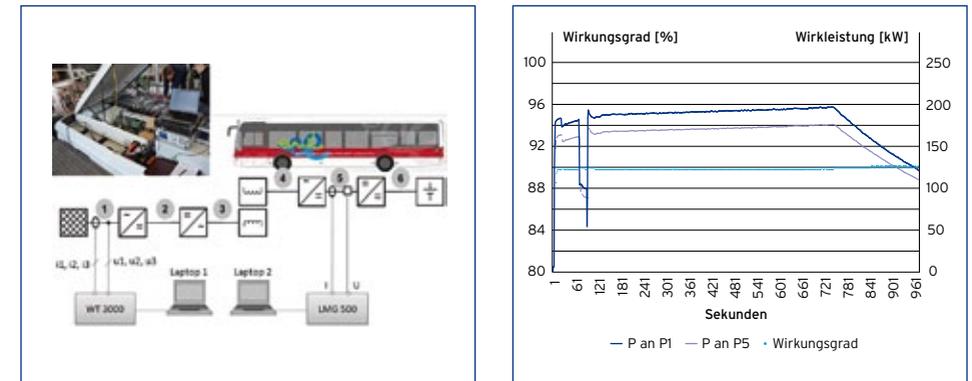


Abbildung 43: Schema und Eindrücke des Messaufbaus für die Wirkungsgradmessung (links)

Abbildung 44: Wirkungsgradmessung des Ladevorganges an Punkt 1 und 5 (rechts)

>> 4.3 ÖKOLOGIE UND KLIMASCHUTZ

Projekt EFBEL (ika, RWTH Aachen)

Ansprechpartner: Kai Scholz-Starke

Inhalt/Ziele:

Im Projekt „Erweiterte Forschungsbegleitung für den Einsatz von energieeffizienten Liniensbussen im Verkehrsverbund Rhein-Ruhr“ (im Folgenden: EFBEL) werden Busse mit verschiedenen Antriebskonzepten bezüglich ihrer Abgas- und Geräuschemissionen sowie der Antriebsstrangeffizienz untersucht.

Neben den Beschaffungskosten spielen Kraftstoffverbrauch und Zuverlässigkeit der Hybridbusse eine maßgebliche Rolle bei der Entscheidung von Verkehrsunternehmen, Hybridbusse statt herkömmlicher Dieselsbusse zu beschaffen. Im Rahmen der Forschungsbegleitung EFBEL wird der technologische Fortschritt untersucht und dokumentiert, um die Entscheidungssicherheit der Verkehrsunternehmen zu erhöhen. Gleichzeitig werden den Herstellern weitere Optimierungspotenziale aufgezeigt. Dabei werden diese Hauptziele verfolgt:

- Dezierte Erfassung des Kraftstoffverbrauchs und der Abgasemissionen sowie der Geräuschemissionen zur Analyse von Einzelereignissen und Haupteinflüssen
- Betrachtung und Bilanzierung der Hauptnebenverbraucher zur Erstellung möglichst vollständiger Energiebilanzen. Der große Einfluss auf den Kraftstoffverbrauch macht eine parallele Betrachtung und Analyse von Verbrauchern wie Heizung und Klimaanlage notwendig.
- Simulation und Einsatzprofilanalyse zur Identifikation und Quantifizierung von Haupteinflussfaktoren auf den Kraftstoffverbrauch auf theoretischer Ebene unter konstanten Rahmenbedingungen zur Einsatzprofiloptimierung
- Analyse von Hybridfahrzeugen der neuen Generation zur Darstellung der technologischen Weiterentwicklung der Fahrzeuge und Evaluierung der Optimierungsmaßnahmen an Soft- und Hardware im Vergleich zu den Fahrzeugen aus dem Vorgängerprojekt
- Analyse des Einflusses von Betriebskonzepten und Fahrerverhalten auf den Kraftstoffverbrauch
- Beobachtung von Wetter- bzw. temperaturbedingten Verbrauchsunterschieden und Verfügbarkeiten (Winter- vs. Sommermonate)
- Analyse des Kraftstoffverbrauchs unter Berücksichtigung von Routenprofilen und Topografiemerkmalen der verschiedenen Einsatzlinien zur Einsatzoptimierung

Koordiniert wird das Projekt durch das Institut für Kraftfahrzeuge (ika) der RWTH Aachen. Projektpartner sind der Verkehrsverbund Rhein-Ruhr, thinkstep und TÜV NORD. Darüber hinaus sind mit der Bogestra, der SWK, TRD und den Hagener Straßenbahnen vier Verkehrsunternehmen in das Projekt eingebunden.

Vorgehensweise:

Zur Erreichung der Projektziele wurden folgende Untersuchungen durchgeführt:

- Messung des Kraftstoffverbrauchs und des Energiebedarfs der Nebenverbraucher
- Messung der Abgasemissionen
- Messung der Geräuschemissionen
- Modellierung und Simulation der Fahrzeuglängsdynamik und des Energieverbrauchs
- Langzeitdatenerfassung der Tankdaten und Verfügbarkeit

Es wurden zwei parallele Messkampagnen durchgeführt. Die Messungen des Kraftstoffverbrauchs, der Abgasemissionen und der Leistungen im elektrischen Teil des Antriebsstranges sowie der Nebenverbraucher erfolgten auf Testfahrten in den in Abbildung 19 dargestellten Einsatzgebieten. Die Linien wurden zuvor analysiert und so ausgewählt, dass eine große Bandbreite an durchschnittlichen Geschwindigkeiten und Topografieklassen abgedeckt wird. Die Messfahrten erfolgten in den Sommermonaten 2013 bis 2015.

	SORT 1	SORT 2	SORT 3
Topo 1	Krefeld (2 Streckern)	Düsseldor/Essen	Düsseldorf 3
Topo 2		Essen	
Topo 3	Hagen	Dortmund/Bochum/ Wuppertal	
Topo 4		Ennepetal/Hagen	Dortmund

Abbildung 45: Einsatzgebiete

Die Zusammensetzung des Abgases wurde mit Hilfe eines portablen Emissionsmesssystems erfasst. Die Geräuschemissionen, aufgeteilt in Innen- und Außengeräusch, wurden auf der hauseigenen Teststrecke des ika aufgezeichnet. Die Langzeitdatenerfassung wurde während der gesamten Laufzeit des Projektes bei den beteiligten Verkehrsunternehmen durchgeführt. Die dabei erfassten Daten wurden zentral gespeichert und ausgewertet, außerdem wurden sie der übergeordneten Begleitforschung in der AG Bus zur Verfügung

gestellt. Die einzelnen Fahrzeuge und Strecken wurden im Rahmen der Modellierungs- und Simulationstätigkeiten mit Hilfe einer Software abgebildet und analysiert.

Die betrachteten Fahrzeuge (siehe Abbildung 46) lassen sich grob in drei Gruppen aufteilen. Zunächst wurden Fahrzeuge betrachtet, deren Antriebsstränge unterschiedliche Hybridkonzepte aufweisen. Es handelt sich zum Teil um Fahrzeuge, die in einem Vorgängerprojekt²⁴ unter Anwendung nahezu identischer Messmethoden analysiert worden waren. So lässt sich – über die obengenannten Kernziele des Vorhabens hinaus – die technische Weiterentwicklung der Fahrzeuge über die letzten Jahre dokumentieren. Eine zweite Klasse von Fahrzeugen zeichnet sich durch den Einsatz alternativer Fahrzeugkonzepte aus. Hier wurden ein VDL Leichtbaubus und ein batterieelektrischer Bus von Solaris vermessen. Zusätzlich wurden dieselbetriebene Referenzfahrzeuge mit in die Analyse einbezogen. Diese decken die unterschiedlichen, vorkommenden Größenklassen sowie die gerade aktuellen Stufen der Abgasgesetzgebung Euro V/EEV sowie Euro VI ab.

Fahrzeugtyp		12m	18m	Euro V/ EEV	Euro VI
Hybrid	Volvo 7700 Hybrid	✓		✓	
	MAN Lion's City Hybrid A37	✓		✓	
	Mercedes Benz Citaro G O530 Bluetec Hybrid		✓	✓	
	Hess SwissHybrid BGH-N2C		✓	✓	
	Volvo 7900 Hybrid	✓			✓
Alternativ	Solaris Urbino 12 electric	✓			
	VDL Citea LLE - 120	✓	✓		
Konv.	Mercedes Benz Citaro Euro VI 12m		✓		✓
	Mercedes Benz Citaro Euro VI 18m	✓			✓
	Solaris Urbino 12	✓		✓	
	MAN Lion's City A37	✓		✓	
	Mercedes Benz Citaro G O530		✓	✓	

Abbildung 46: Fahrzeuge zur Vermessung

24 Forschungsbegleitung für den Einsatz von Hybridbussen im Verkehrsverbund Rhein-Ruhr, Forschungsvorhaben. Koordiniert durch ika, RWTH Aachen, gefördert vom BMVBS, 2010-11.

Hervorzuheben ist die Durchführung der Begleitforschung nach einer durchgängig angewandten Untersuchungsmethodik für alle betrachteten Fahrzeuge. So lassen sich fundierte vergleichende Analysen erstellen. Zusätzlich zu den Messkampagnen, die jeweils nur einen zeitlich begrenzten Blick auf das Verhalten der jeweiligen Fahrzeuge erlauben, fließen die langfristige Perspektive und die Begebenheiten des realen Einsatzes durch die Langzeitdatenerfassung in die Betrachtung ein.

Ergebnisse

Die Ergebnisse zu den Emissions- und Geräuschmessungen sowie den Anteil an rein-elektrischem Fahren befinden sich in Kapitel 2.3.1, 2.3.2. bzw. 2.3.3.

Bis zum Projektende werden die Analysen der Messkampagnen komplettiert und dokumentiert. Eine detaillierte Darstellung und Diskussion der Messergebnisse aller Einzeluntersuchungen ist dem EFBEL-Projektabschlussbericht zu entnehmen, der im Laufe des Jahres 2016 veröffentlicht wird. Eine Extrapolation der Ergebnisse auf innerstädtische Gesamtmissionen mit Bezug auf Schadstoffe und Lärm ist in Vorbereitung. Eine Anwendung der in EFBEL erarbeiteten Untersuchungsmethodik auf weitere Antriebskonzepte und Busfabrikate wird empfohlen, um bei zukünftigen Bewertungen vergleichbare Ergebnisse erreichen zu können.



>> 4.4 WIRTSCHAFTLICHKEIT

Projekt E-Bus Berlin (Berliner Verkehrsgesellschaft, BVG)

Inhalt/Ziele

Die Inhalte und Ziele des Projektes wurden bereits im Kapitel 4.2.

Zur Bestimmung der Wirtschaftlichkeit werden Betriebsdaten erfasst und zukünftige Rahmenbedingungen prognostiziert. Diese Werte dienen als Eingangsparameter für mathematische Modelle zur Bestimmung der Life Cycle Cost.

Die Berechnung der Lebenszykluskosten bzw. der Total Cost of Ownership (TCO) wird für aktuelle alternative Bussysteme und Konzepte (Plug-In Hybride, Opportunity und Overnight charging, Brennstoffzelle, etc.) durchgeführt und mit dem Betrieb von konventionellen Dieselnissen verglichen. Die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung berücksichtigt dabei insbesondere betriebliche Anpassungen, die durch die jeweilige Technologie erforderlich sind. Der Netzbetrieb von Buslinien zeichnet sich durch eine hohe Anforderungsheterogenität aus, d. h., durch verschiedene Linienanforderungen (Fahrprofile) können sich unterschiedliche Kostenstrukturen je nach eingesetzter Technologie ergeben. Es ist vorgesehen, die TCO-Bewertung über verschiedene Technologien auf diverse Linienprofile auszudehnen. Je nach Liniencharakteristik kann so das kosteneffizienteste Bussystem bestimmt werden.

Des Weiteren wird in einer Szenarioanalyse eine Einschätzung des Marktpotenzials von alternativen Bussystemen vorgenommen. Unter Annahme von verschiedenen Kostenentwicklungen und Rahmenbedingungen werden die Lebenszykluskosten unterschiedlicher Systeme bewertet.

Ergebnisse zur Wirtschaftlichkeit

Da die Untersuchung noch nicht abgeschlossen ist, können noch keine Ergebnisse vorgestellt werden.

Projekt Elektrobus-Linie 79 (Dresdner Verkehrsbetriebe, DVB)

Inhaltlich wurde das Projekt bereits in Kapitel 4.2 vorgestellt.

Ergebnisse zur Wirtschaftlichkeit

Die Elektrobus-Linie 79 zeigt als Schaufenster-Projekt in erster Linie die technische Machbarkeit einer bis dato nicht in Großserie erhältlichen Gesamtlösung zur Elektrifizierung von ÖPNV-Buslinien. Neben der reinen Realisierbarkeit spielt der Kostenfaktor eine entscheidende Rolle. Zur Betrachtung der Investitionen, zeigt im Folgenden eine grobe Aufschlüsselung.

Tabella 7: Kostenaufstellung Elektrobus-Linie 79

Posten	Detail	Kosten
Fahrzeug	12 m NFL Standardbus, ohne Batterie	480.000 €
Traktionsbatterie	200 kWh Lithium-Eisenphosphat	300.000 €
Hochstromladegerät	Inkl. Ladehaube, anteilig Mastkosten	190.000 €
Haltestelle	Behindertengerecht, Fahrgastunterstand, DFI	190.000 €

>>5 ANHANG

Tabelle 8: Übersicht der depotseitigen Ladeinfrastruktur der Betreiber mit batterieelektrischen Bussen (Stand Dezember 2015)

Ladeinfrastruktur im Depot	Gelegenheitsladung (Opportunity Charging)		Gelegenheitsladung (Opportunity Charging)			Übernachtladung (Overnight Charging)
	Braunschweiger Verkehrs-GmbH	Berliner Verkehrsbetriebe	Rhein-Neckar-Verkehr	Dresdner Verkehrsbetriebe	Hochbahn	Stadtwerke Osnabrück
Beschreibung Ladeinfrastruktur im Depot	1 Ladeplatz induktiv	4 Ladeplätze induktiv/ 1 Ladeplatz induktiv	1 Ladeplatz induktiv	1 Ladeplatz induktiv	Ladeplatz 1-4 induktiv über Typ 2-Stecker, Mode 3	2 Ladeplätze induktiv über Stecker
Stromübertragungssystem	Ladepad unter Fahrzeug, Pickup an Fahrzeug- unterseite	CCS-Stecker Typ 2 DC seitlich rechts hinter 2. Achse	Ladepad unter Fahrzeug, Pickup an Fahrzeugunterseite	CCS-Stecker Typ 2, DC	Über Vorderachse rechts Stecker Typ2, Mode 3	Typ DS 6, seitlich rechts über Achse 2 Typ DSN3, Heckklappe rechts
Ladestrom/-leistung	400 A/200 kW AC oder DC möglich	63 A, 3 phasig/30 kW	3 phasig/200 kW	35 kW Ausgang, Eingang AC 400V 63A	16 A/11 kW	400V/64A, 3phasig / 25 kW 400V/20A 3phasig/8,8 kW
Ladeprozess im Depot	Nur induktiv, d. h. keine lange Ladung sondern max. 15 min. Ein Ladepad im Depot u. sofortiger Verfügbarkeit statt vieler induktiver Stationen mit evtl. Fahr- zeugzusatzbedarf durch lange Ladephasen	Plug In Ladung	200 kW, Ladedauer je nach Ladezustand, üblicher- weise 12-15 Minuten Nach- ladung am Abend	Nach Bedarf, meist unter 2 Stunden, vor dem Dienst ist Vorkonditionierung bei Temp. unter 15°C vorgesehen	Über Nacht (max. 4 Stunden) mit 11 kW inkl. Über Nacht (max. 4 Stunden) mit 11 kW inkl.	steckergebundenes Übernacht-Laden mit 25 kW AC für ca. 6-8 h inkl. Batteriebalancing steckergebundenes Übernacht-Laden mit 8,8 kW AC für ca. 8-10 h inkl. Batteriebalancing
Hardwarekosten	Konduktiv mit 30-35 kW 25-40 T€, Induktiv mit 200 kW > 100 T€		Konduktiv mit 30-35 kW 25-40 T€, Induktiv mit 200 kW > 100 T€			
Installationsaufwand	Konduktiv mit 30-35 kW 10-50 T€, Induktiv mit 200 kW 40-60 T€		Konduktiv mit 30-35 kW 10-50 T€, Induktiv mit 200 kW 40-60 T€			
Umbaumaßnahmen Depot	20 KV Station (kein Muss)		Errichtung Ladeinfrastruktur neben Busabstellhalle		Bau vorgelagerte Verteilung, Herstellung Anschluss- punkte Ladegeräte	Stromversorgung
Planungsdauer	6 Monate	1 Jahr	9 Monate	6 Monate, 2 Wochen Aufwand	12 Monate	ca. 3 Jahre
Umbaudauer	2 Wochen	2 Monate	1 Monat	1 Woche	3 Monate	2 bis 3 Wochen

Tabelle 9: Übersicht der linienseitigen Ladeinfrastruktur der Betreiber mit batterieelektrischen Bussen (Stand Dezember 2015)

Ladeinfrastruktur auf Linie	Gelegenheitsladung (Opportunity Charging)		Gelegenheitsladung (Opportunity Charging)			Übernachtladung (Overnight Charging)
	Braunschweiger Verkehrs-GmbH	Berliner Verkehrsbetriebe	Rhein-Neckar-Verkehr	Dresdner Verkehrsbetriebe	Hochbahn	Stadtwerke Osnabrück
Beschreibung Ladeinfrastruktur auf Linie inkl. Lage (falls vorhanden)	2 auf Linie mit 3 am zentralen Pausen- hof, um bei Verspätungen und dichtem Takt ladefähig zu sein	Induktiv an beiden Endhaltestellen der Linie 204	6 Ladestationen (beide Endhaltestellen + 4 weitere auf der Strecke)	Hochstrom, am EP Dreyßigplatz	Jeweils 2 konduktive Ladeplätze an Endhaltestellen	derzeit keine Nachladung auf der Strecke
Stromübertragungssystem	Induktiv am Unterboden mit Pick-up System	Induktiv am Unterboden mit Pick-up System	Induktiv am Unterboden mit Pick-up System	Konduktiv, Überdachladung,	Ladearm auf Fahrzeug	Konduktives Laden über Pantograph, System von Siemens
Ladestrom/-leistung	200 kW, 400 A AC oder DC möglich	200 kW	200 kW in regulärem Betrieb	200 kW, 330 A	System auf 300 kW/ 400 Ampere ausgelegt	
Ladeprozess /-nutzung	Endhaltestelle + Haltestelle gemäß Ist-Betrieb (keine extra Ladezeit)	Ladedauer je nach SOC, Aufteilung Ladung noch zu ermitteln Südkreuz ca. 8min Hertzallee ca. 4 min.		Meist 1-3 Minuten, bei Blockpausen (4) ca. 15 Minuten	Max. 7 Minuten Ladedauer Anforderung busseitig 120 kW für Batterieladung	
Hardwarekosten	Konduktiv mit 200-300 kW 115-500 T€ (inkl. Installationsaufwand), Induktiv mit 200 kW 150-300 T		Konduktiv mit 200-300 kW 115-500 T€ (inkl. Installationsaufwand), Induktiv mit 200 kW 150-300 T€			
Installationsaufwand	Konduktiv mit 200-300 kW 75 T€ (einschl. Mast und Planung), Induktiv mit 200 kW 60-100 T€		Konduktiv mit 200-300 kW 75 T€ (einschl. Mast und Planung), Induktiv mit 200 kW 60-100 T€			
Umbaumaßnahmen Haltestellen	Ladeplatte in Straße integriert, Straße voll nutzbar.	Markierungsarbeiten u. Versetzen von Haltestel- lenmasten	Ladepad in Fahrbahn; Technikbox im Gehwegbereich		Lademasten, Fahrzeug- Positionierungshilfen, Anpassung Haltestellenan- fahrt, Einbau Trafo, Anschluss Stromnetz (an U-Bahn bzw. öffentliches Netz)	
Planungsdauer	6 Monate	1 Jahr	9 Monate	6 Monate	12 Monate	
Umbaudauer	2 Wochen	2 Monate	1 Monat	2 Monate	6 Monate	
Einschränkungen im Linienverkehr während Baumaßnahmen (falls gegeben)	rund 4 Wochen Betonaus- härtung, temporäre Haltestellenverlegung	Temporäre Verlagerung der Wendestelle	Ersatzhaltestellen während Umbauphase	Nein, nur Haltestellenverle- gung um 20 m.	Einschränkungen in Alsterdorf durch Neubau Überliegeplätze (keine Überlieger während Bauphase vorhanden)	

Werkstattanpassung für Busse mit (teil)elektrifiziertem Antriebsstrang

Für den Einsatz von Bussen mit (teil)elektrifiziertem Antriebsstrang sind Werkstattanpassungen nötig. Tabelle 10 und Tabelle 11 geben einen Überblick über die vorgenommenen Werkstattanpassungen der verschiedenen Verkehrsbetriebe. Betreiber, die bereits Busse mit elektrischem Antrieb betreiben, wie z.B. Hamburg (Brennstoffzellenhybrid) oder Dresden (Dieselhybrid) profitieren dabei von den bereits durchgeführten Anpassungs-

maßnahmen in der Werkstatt, die für den Einsatz von Dieselhybrid- oder Brennstoffzellenhybridbussen vorgenommen wurde. Im Wesentlichen sind die Einrichtung eines Dacharbeitsstandes und die Anschaffung der für die Fahrzeuge erforderlichen Diagnosegeräte und HV geeignetes Werkzeug vorzusehen. Die genannten Kostenschätzungen für die Umbaumaßnahmen der Werkstätten für Busse mit elektrischem Antriebsstrang liegen im Bereich von 0 bis 150.000 € entsprechend den erforderlichen Maßnahmen bei einer Umbaudauer inkl. Planung von bis zu 6 Monaten.

Tabelle 10: Beispiele für Werkstattumrüstungen für Hybridbusse (Auszug) (Stand: 2011)²⁴

Werkstattumrüstung	Hamburger Hochbahn/ Fahrzeugwerkstätten Falkenried GmbH	SWK Mobil GmbH	Dresdener Verkehrsbetriebe AG	Leipziger Verkehrsbetriebes AG	Stuttgarter Straßenbahnen AG	Stadtwerke München GmbH
Umbaumaßnahmen Werkstatt	Vorhandene Infrastruktur Wasserstoff-Hybridwerkstatt, ausgestattet mit Dacharbeitsplatz, Deckenkrananlage, Vorrichtungen zur Montage v. Achsen u. HV-Batterie	Keine baulichen Maßnahmen erforderlich	Einbau stationärer Dacharbeitsstand 18 m, 2 mobile Dacharbeitsstände für Heck bzw. linke Fahrzeugseite, Absturzsicherung	Nutzung des bereits in 2007 eingerichteten Dacharbeitsstandes, keine weiteren Investitionen bislang.	Dacharbeitsstand	Sanierung des Betriebshofes inkl. Arbeitsstand für Hybridbusse geplant
Anschaffungen	MB-Stardiagnose, Isolationstester, div. Werkzeuge zur Bearbeitung von Hochvoltkabeln und Komponenten	Vorgeschriebene Leiter, Absperrung, Hinweisschilder, Spannungsprüfer, Batterieschlüssel	Diagnosegeräte, Messgerät für Isolation und Potenzialausgleich, HV-isoliertes Werkzeug, Spezialwerkzeug, Absperrständer mit Aufrollbändern, Warnschilder		Isolationsmessgerät	
Ersatzteillager/zusätzl. Bürofläche	Hybridkomponenten: nur geringe Vorhaltung; Standardkomponenten: Zentrallager		noch keine Bevorratung			
Umbaudauer	ca. 6 Monate	3 Monate	6 Monate		4 Monate	
Mitarbeiterschulung	Modulares Konzept für Ausbildung zu EFkffT ²⁵ (nach DGUV 200-0005/ BGI 8686): Basierend auf einer elektrotechnischen Ausbildung erfolgt eine Sensibilisierung, gefolgt von einem Grundmodul und einem Fahrzeugtypspezifischen Fachmodul. Üblicherweise werden mehrere Mitarbeiter zur EFkffT geschult.		Modulares Konzept für Ausbildung zu EFkffT ²⁵ (nach DGUV 200-0005/ BGI 8686): Basierend auf einer elektrotechnischen Ausbildung erfolgt eine Sensibilisierung, gefolgt von einem Grundmodul und einem Fahrzeugtypspezifischen Fachmodul. Üblicherweise werden mehrere Mitarbeiter zur EFkffT geschult.			
Investitionskosten (Schätzung)	ca. 1 Mio € (Neubau H ₂ und HV geeignete Wartungshallte)	20.000 €	35.000 €		60.000 €	Sanierung Betriebshof: ca. 50.000-100.000 €;

²⁴ Weitere Informationen zur Grundausrüstung von Werkstätten für die Wartung von Hybridbussen finden sich u.a. im Anhang des Abschlussberichts zum begleitenden Prüfprogramm im Rahmen der „Effizienz- und Kostenanalyse für den Linienbetrieb von Hybridbussen“ im Auftrag des BMU, 2012. <http://www.erneuerbar-mobil.de/de/projekte/foerderprojekte-aus-dem-konjunkturpaket-ii-2009-2011/hybridbusse/abschlussbericht-begleitprogramm-public.pdf>

²⁵ Elektrofachkraft für festgelegte Tätigkeiten

Tabelle 11: Übersicht der Anpassungsmaßnahmen in der Werkstatt der Betreiber mit batterieelektrischen Bussen (Stand Dezember 2015)

Werkstattumrüstung	Gelegenheitsladung (Opportunity Charging)			Gelegenheitsladung (Opportunity Charging)		Übernachtladung (Overnight Charging)	
	Braunschweiger Verkehrs-GmbH	Berliner Verkehrsbetriebe	Rhein-Neckar-Verkehr	Dresdner Verkehrsbetriebe	Hochbahn	Stadtwerke Osnabrück	Kasseler Verkehrs- Gesellschaft
Beschreibung Umbaumaßnahmen Werkstatt	Dacharbeitsstand (vorher nicht vorhanden)	Umbau bestehender Räumlichkeiten. Evtl. Anschaffung neuer mobilen Dacharbeitsstand und einer Hebeeinrichtung	Erweiterung zu vorhande- nem Dacharbeitsstand	Nur Diagnose und Schulung, sonst keine Umbauten erforderlich, da Werkstatt bereits umgerüstet wurde für Betrieb von Hybridbussen	Nutzung der für H ₂ /BZ Busse errichteten Werkstatthalle	Keine	Keine, da zeitlich befristeter Einsatz E-Bus. Ladegerät wurde von Bushersteller ausgeliehen
Anschaffung	1 x Laptop (400 €)	1 x Diagnosetool (Notebook mit 3 Systemen) (15.000 €)	Erweiterung Dacharbeits- stand (3.000 €)	1 x Diagnose (Im Fahrzeugpreis enthalten)	Werkzeuge inkl. Diagnose- tools in Wartungsvertrag mit Hersteller enthalten	Keine	Keine
Anpassung/Neuerrichtung Ersatzteillager/zusätzl. Bürofläche	Nicht erforderlich	Zusätzliche Büro- und Arbeitsfläche	Einlagerung Ersatzteilkpaket	Nicht erforderlich (s.o.)		Keine	Keine
Umbaudauer	1 Monat	4 Monate	k.A.	Nicht erforderlich (s.o.)	Planung und Bau der Halle 12 Monate	-	-
Investitionskosten Werkstatt	Bandbreite von 0-150.000 €, Diagnosewerkzeuge (400-15.000 €). Umbauten: 3.000 (Erweiterung vorhandener Dacharbeitsstand) - 150.000 € (Neuanschaffung Dacharbeitsstand)			Bandbreite von 0-150.000 €, Diagnosewerkzeuge (400-15.000 €). Umbauten: 3.000 (Erweiterung vorhandener Dacharbeitsstand) - 150.000 € (Neuanschaffung Dacharbeitsstand)			

Mitarbeiterqualifikation für batterieelektrische Busse

Die von den Verkehrsbetrieben durchgeführten Schulungen für das Fahr- und das Werkstattpersonal sind in Tabelle 12 zusammengestellt.

Tabelle 12: Mitarbeiterqualifikation – Übersicht durchgeführte Schulungen für batterieelektrische Busse

Mitarbeiterqualifikation	Gelegenheitsladung (Opportunity Charging)			Gelegenheitsladung (Opportunity Charging)		Übernachtladung (Overnight Charging)	
	Braunschweiger Verkehrs-GmbH	Berliner Verkehrsbetriebe	Rhein-Neckar-Verkehr	Dresdner Verkehrsbetriebe	Hochbahn	Stadtwerke Osnabrück	Kasseler Verkehrs- Gesellschaft
Schulung Mitarbeiter ²⁶	1,5 h Fahrerschulung intern Werkstattschulung steht noch aus	15 Mitarbeiter Hochvoltsensibilisierung zu je 5 Stunden, ca.30 Fahrer geschult über Multiplikatoren zu je 5 Stunden, 2 Mitarbeiter zu Arbeiten an Hochvoltsystemen geschult (5 Tage)	Schulung von 36 Fahrpersonale durch eigene Fahrschule; Schulung Werkstatt- mitarbeiter 2 x 3 Tage	Noch offen, Hersteller konnte noch keine Schulungen anbieten, außer Fahrereinweisung. Sensibilisierung EFK à 40-100 h je nach Vorkenntnisse, Unterweisung 20 Fahrer zu je 2 Stunden	6 Mitarbeiter (MA) Ausbil- dung zum zertifizierten Hybridbus-Techniker à 5 Tage + Ergänzungsaus- bildung PHEV à 2 Tage, 27 MA Lehrgang zum Freischalten der HV-Anlage à 2 Tage. Einweisung (à 8 h) aller 330 Fahrer des Be- triebshofes Hummelsbüttel in Fahrzeug & Technik der Ladestation, 250 Fahrer bereits geschult HV-Sensibilisierung aller FFG- Mitarbeiter durch FFG (à 4 h).	BGI 8686 ²⁷ Stufe 1: nichtelektro-techn. Arbeiten: 14 MA à 4 h BGI 8686 Stufe 2: elektrotechn. Arbeiten im spannungsfreien Zustand: 5 MA à 16 h BGI 8686 Stufe 3: Arbeiten unter Spannung: 4 MA à 8 h Fahrereinweisung: 130 MA à 1,5 h	Alle Wartungen am Fahrzeug wurden durch den Hersteller durchgeführt. Einweisung Fahrpersonal
Zukünftige Maßnahmen Personal	HV Schulung Teil 2 steht noch für 2 Mitarbeiter(MA) aus.	Fahrer sollen stetig auf neue Erkenntnisse geschult werden Werkstattpersonal soll zu Arbeiten im stationären Bereich (Ladestation), wie auch Umgang mit HV-Batterie geschult werden.	Erweiterung Schulung Fahrerkreis Weitere Werkstatt- schulungen (mehr EFKffT)	Bestehende EFK werden qualifiziert	Weitere Schulungen geplant, wenn Batteriebusse Mitte 2016 in Liniendienst gehen	Im Zuge der weiteren Elektrifizierung der Fahr- zeugflotte sind weitere Qualifikationsmaßnahmen in der Werkstatt geplant.	

²⁶ Vorgaben für Schulung Werkstattmitarbeiter entsprechend DGUV Information 200-005/ BGI 8686

²⁷ Jetzt DGUV Information 200-005

WEITERFÜHRENDE INFORMATIONEN:

Statusberichte aus der AG Innovative Antriebe Bus



AG Bus Projektübersicht
2015/16



AG Bus Statusbericht
2015/16

Verfügbar unter www.now-gmbh.de

Elektrobus Projekte in Deutschland:



<https://www.vdv.de/ebus-projekt.aspx>

Elektrobus Projekte in Europa:



ZeEUS EU Demonstrationsprojekt

<http://zeeus.eu/demonstrations-activities/demonstrations>



eLIPTIC EU Forschungsprojekt

<http://www.electric-project.eu/>

Bildnachweise:

Titel (von links nach rechts):

Verkehrsbetriebe Hamburg-Holstein, Stuttgarter Straßenbahnen, Stadtbus Ingolstadt, Wolfsburger Verkehrs-GmbH, Hagener Straßenbahn, Kasseler Verkehrs-Gesellschaft (Andreas Fischer), Dresdner Verkehrsbetriebe, üstra Hannoversche Verkehrsbetriebe, Braunschweiger Verkehrs-GmbH

- S. 9 TÜV NORD, TU Braunschweig/ Physikalisch-Technische Bundesanstalt Braunschweig
- S. 16 Hagener Straßenbahn, REGIOBUS Mittelsachsen GmbH
- S. 19 Heidenheimer Verkehrsgesellschaft, Leipziger Verkehrsbetriebe
- S. 29 Stadtwerke Osnabrück, Berliner Verkehrsbetriebe (Oliver Lang)
- S. 47 Fraunhofer-Institut für Verkehrs- und Infrastruktursysteme (IVI), Rhein-Neckar Verkehr
- S. 52 Braunschweiger Verkehrs-GmbH, Dresdner Verkehrsbetriebe
- S. 59 TRD Reisen Fischer, Bochum-Gelsenkirchener Straßenbahnen
- S. 60 Stadtbus Ingolstadt, Münchner Verkehrsgesellschaft
- S. 64 Friedrich Jasper Rund- u. Gesellschaftsfahrten GmbH, Hagener Straßenbahn
- S. 73 Verkehrsgesellschaft Meißen
- S. 75 Hamburger Hochbahn, Stuttgarter Straßenbahnen
- S. 83 Volvo Bus Corporation, 40508 Göteborg Schweden
- S. 89 Hamburger Hochbahn

Bilder ab S.91 wurden von den jeweiligen Verkehrsbetrieben bzw. Projektpartnern zur Verfügung gestellt.



thinkstep

hy **SOLUTIONS**
Innovative Antriebe für Hamburg

VDI|VDE|IT