

Arbeitsgruppe Innovative Antriebe Bus
Statusbericht 2014



>> 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 ANTRIEBSTECHNOLOGIEN	10
>> 2. ERSTE ERGEBNISSE	12
2.1. PRAXISTAUGLICHKEIT UND EINSATZREIFE	12
2.1.1. LAUFLEISTUNG	12
2.1.2. VERFÜGBARKEIT	16
2.2. EFFIZIENZ/ KRAFTSTOFFVERBRAUCH	20
2.2.1. ROUTENCHARAKTERISTIK UND KLIMATISCHE BEDINGUNGEN	20
2.2.2. ERZIELTE KRAFTSTOFFEINSPARUNG	23
2.2.3. EINFLUSS HEIZUNG UND KLIMATISIERUNG AUF ENERGIEVERBRAUCH	24
2.3. ÖKOLOGIE UND KLIMASCHUTZ	28
2.3.1. TREIBHAUSGAS- UND SCHADSTOFFEMISSIONEN	28
2.3.2. GERÄUSCHEMISSIONEN	33
2.3.3. ZERO EMISSION BETRIEB DIESELHYBRIDBUS – ANTEIL REIN ELEKTRISCHES FAHREN	36
2.4. WIRTSCHAFTLICHKEIT	40
>> 3. ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK	46

>> 1. EINFÜHRUNG: ARBEITSGRUPPE INNOVATIVE ANTRIEBE BUS

Im öffentlichen Personennahverkehr (ÖPNV) mit Bussen greifen deutsche Verkehrsunternehmen bei der Fahrzeugauswahl seit Jahrzehnten vorwiegend zu Fahrzeugen mit Dieselmotor, der den Stand der Technik darstellt. Vor dem Hintergrund steigender Anforderungen bei der Luftqualität, der Vermeidung von Lärm und beim Klimaschutz besteht allerdings ein wachsendes Interesse bei Verkehrsunternehmen, insbesondere in Metropolen, künftig auf innovative Busantriebe umzusteigen. So gibt es zum einen Ansätze, alternative Kraftstoffe, z. B. in Form von Erdgas- bzw. Biomethan betriebenen Bussen, im Markt zu etablieren. Zum anderen ist die (Teil-) Elektrifizierung des Antriebsstranges mit Speicherung der elektrischen Energie im Bus (z.B. in Batterien) eine weitere Technologieoption. Wasserstoffbetriebene Brennstoffzellenbusse verfügen ebenfalls über einen elektrischen Antriebsstrang und befinden sich bereits in der Praxiserprobung. Insgesamt blieb jedoch eine Einführung von Fahrzeugen mit elektrifiziertem Antriebsstrang in größerem Umfang bisher noch aus.

Durch Fördermaßnahmen der Bundesregierung unterstützt, werden aktuell verschiedene teilelektrische Dieselhybridbusse, Brennstoffzellenbusse und reine Elektrobusse¹ in deutschen Verkehrsunternehmen in der Praxis eingesetzt und dabei im Realeinsatz 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 und dienen nicht zuletzt der nachhaltigen Markteinführungsunterstützung (Hybridbusse) bzw. der Vorbereitung dieser innovativen Antriebstechnologien für einen künftigen Markt (Elektrobusse).

Die Ergebnisse und Erfahrungen der geförderten Projekte sind von wesentlichem Interesse für Anwender, Nutzer, die Fahrzeugindustrie sowie die fördernden politischen Instanzen. 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 aus dem Konjunkturpaket II² zusammen und setzt diese fort. Dabei werden sowohl in früheren Phasen identifizierte

¹ Batterie und Brennstoffzelle

² Im Rahmen des Konjunkturpakets II der Bundesregierung wurden von BMVI und BMUB bereits von 2009–2012 die Erprobung von zusammen mehr als 100 Hybridbussen gefördert und durch entsprechende Begleituntersuchungen evaluiert. Diese Aktivitäten wurden nun in der AG Innovative Antriebe Bus zusammengeführt.

Fragestellungen aufgegriffen als auch aktuelle Themen zum Praxiseinsatz adressiert. Ein Schwerpunkt der AG ist die Bewertung von:

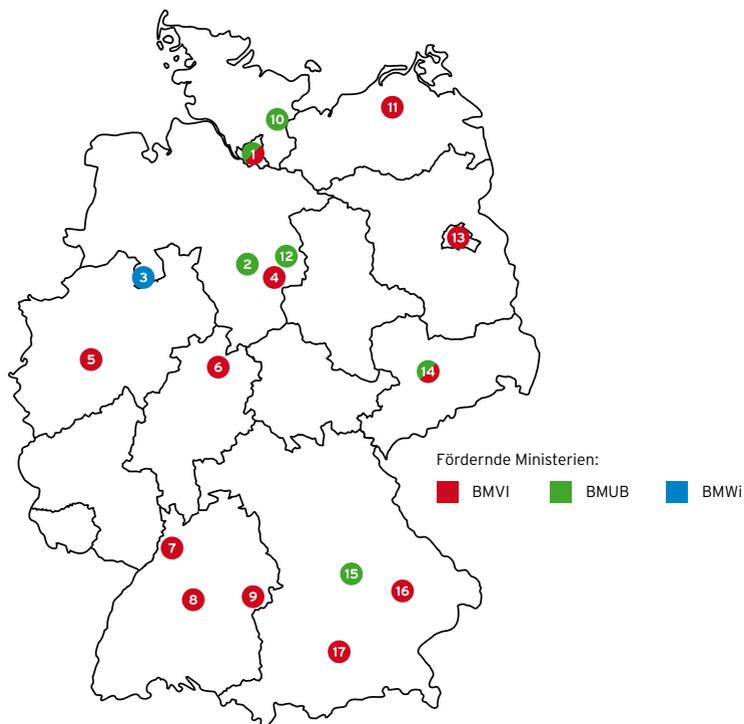
- Optimierungsmaßnahmen an bereits im Einsatz befindlichen innovativen Fahrzeugen,
- neuen technischen Entwicklungen im Bereich Dieselhybrid- und Plug-In Hybridbussen
- rein elektrischen Antrieben, bei denen unterschiedliche Speicher- und Ladetechnologien zum Einsatz kommen.

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 25 Verkehrsbetriebe, Vertreter der Wirtschaft (10 Hersteller und Zulieferer von Linienbussen mit innovativen Effizienztechnologien), der Verband der deutschen Verkehrsunternehmen VDV und Vertreter von Verkehrsverbänden, sowie 8 Organisationen aus Wissenschaft & Beratung. Sie vernetzt 29 regionale 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). Koordiniert wird die AG von NOW GmbH und hySOLUTIONS GmbH in Zusammenarbeit mit VDI/VDE-IT. Die Begleitforschung wird von PE INTERNATIONAL koordiniert.



29 Projekte
34 Betreiber
171 Dieselhybridbusse
86 Solobusse
85 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 (17 S), Süderelbe Bus (5 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)
RVK
H2 Busse (2 S BZ, 2 G BZ)

6 **FREE**
Kassel - Regionalmanagement Nordhessen (1 ME)

7 **Primove Mannheim**
Mannheim - RNW GmbH (2 SE)

8 **Hyline S**
Stuttgart - SSB (5G + 5 GP)
S presso
Stuttgart - SSB (4 S BZ)

9 **ElvoDrive**
Voith AG (1 S)

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

11 **Inmod Mecklenburg-Vorpommern**
GBB (1 ME), BBW (1 S), AVG (1 S)

12 **Hybridbus Wolfsburg**
Wolfsburger Verkehrsgesellschaft (3 S)

13 **E-bus Berlin**
BVG (4 SE)

14 **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)
Linie 79
Dresden - DVB (1 SE)
eBus Butterfly
Leipzig - LVB (2 SE)
eBus Skorpion
Leipzig - LVB
gefördert durch Sächsisches Ministerium für Wirtschaft, Arbeit und Verkehr

15 **Hybridbusse für Ingolstadt**
Stadtbus Ingolstadt (3 S)

16 **Primove Road**
Pilsting (1 SE)

17 **Hybridbuserprobung**
Münchener Verkehrsgesellschaft (MVG) (2 S, 2 G)

Der vorliegende Bericht informiert über den gegenwärtigen Stand der Begleitforschungsaktivitäten, die im Rahmen der Arbeitsgruppe durchgeführt werden und gibt einen Überblick über die aktuell laufenden Projekte.

>> 1.1. INHALTE DER AG INNOVATIVE ANTRIEBE BUS

Entsprechend den Zielen 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 Umweltvorteile im Mittelpunkt. Zudem sollen auch die künftigen Potenziale der Technologien ausgelotet werden, soweit dieses aktuell bereits möglich ist. Dies dient der Unterstützung der Industrie bei der Entwicklung innovativer Antriebskonzepte sowie der Schaffung eines Marktpulses zur Stärkung der Nachfrage für Hybrid- und rein elektrische Antriebe für den ÖPNV mit Bussen.

Hierzu wurde bereits im Rahmen früherer Begleitforschungsaktivitäten ein abgestimmtes Vorgehen zur Evaluation entwickelt. Das Vorgehen basiert auf gemeinsam entwickelten 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
- Akzeptanz

Anhand von spezifischen Evaluationskriterien für jede der Bewertungskategorien werden die technische und die betriebliche Leistungsfähigkeit sowie die ökologischen Effekte der Busse im Vergleich zu konventionellen Dieselnissen bewertet. Die Wirtschaftlichkeit wird für Dieselhybridbusse näher betrachtet. Für rein elektrische Busse wird aufgrund des aktuellen Entwicklungsstandes, der zurzeit noch nicht als serienreif betrachtet werden kann, und der fehlenden Langzeitdatenerfassung von einer solchen Betrachtung bewusst abgesehen, da sich hier momentan noch keine verlässlichen Aussagen treffen lassen. Die Wirtschaftlichkeit, die gerade im Hinblick auf die zukünftige Entwicklung des Marktes

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

einen zentralen Aspekt darstellt, ist im Rahmen zukünftiger Begleitforschungsaktivitäten auf jeden Fall zu adressieren.

Die Themenbereiche Qualifikation und Akzeptanz (bei Fahrer und Fahrgästen) werden ebenfalls in der AG behandelt, da sie aber bereits eingehend in den früheren Begleitforschungsaktivitäten betrachtet wurden, bilden sie in den aktuellen Evaluationsaktivitäten keinen expliziten Schwerpunkt. Die Arbeit der AG soll ferner helfen, die Akzeptanz für die neuen Antriebstechnologien im Sinne einer abgestimmten und gezielten Öffentlichkeitsarbeit zu steigern.

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

Abbildung 2: Bewertungskategorien und Evaluationskriterien der AG Bus

>> 1.2. DATENERFASSUNG

Die Datenerfassung und die anschließende Evaluierung basieren auf zwei Säulen (siehe Abbildung 3). Auf der einen Seite erfolgt eine kontinuierliche Langzeitdatenerfassung unter Verwendung der webbasierten SoFi Software von PE International zur Bewertung der Betriebserfahrungen und -performance im Sinne einer Fortschrittskontrolle über den Betrachtungszeitraum (Januar 2013 - September 2014) hinweg. Andererseits werden aber auch dezidierte Messfahrten und -aktivitäten zu Treibstoffverbrauch, Emissionen und Lärm unter spezifisch festgelegten Randbedingungen durchgeführt, z. B. im Rahmen des Projektes EFBEL. Dieses methodische Vorgehen zur Absicherung der Evaluierung hat sich aus den Vorgängeraktivitäten bewährt und wird weiter optimiert. Von zentraler Bedeutung ist dabei nicht zuletzt, dass bei beiden Datenerfassungsansätzen Daten sowohl für die Fahrzeuge mit innovativen Antrieben als auch für Referenzfahrzeuge mit konventionellem Dieselantrieb in repräsentativen Einsatzkontexten gesammelt werden.

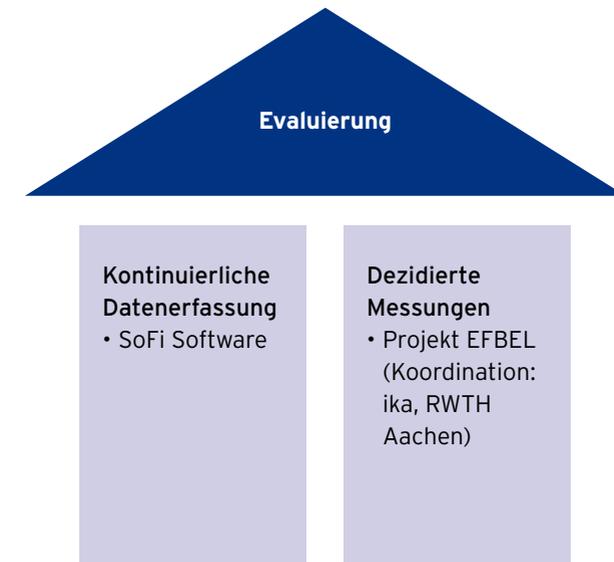


Abbildung 3: Langzeitdatenerfassung und dezidierte Messkampagnen als Säulen der Evaluierung.

>> 1.3. BETRACHTETE ANTRIEBSTECHNOLOGIEN

Zum Stand September 2014 befinden sich 166 Nahverkehrsbusse von 22 Betreibern in der Datenerfassung. Diese teilen sich entsprechend Tabelle 1 in 123 Hybrid- und 4 Elektrobusse auf. Die Hybridbusse sind praktisch gleichmäßig in 61 Solo und 62 Gelenkbusse aufgeteilt. Darüber hinaus sind 39 konventionelle Dieselmotoren (20 Solo und 19 Gelenk) ebenfalls Teil der Datenerfassung als Referenz. Bei den Elektrobusen handelt es sich bislang um Batterie-Midibusse mit einer Länge zwischen 6 und 10,5 m, die allesamt induktiv über Kabel geladen werden. In Braunschweig ist ein erster 12 m Bus mit induktiver Nachladetechnologie bereits im Einsatz. Hier beginnt die regelmäßige Langzeitdatenerfassung zusammen mit den zum Ende des Jahres in den Liniendienst gehenden Gelenkbusen ab Anfang 2015. Eine Berücksichtigung der Brennstoffzellenbusse ist ebenfalls für 2015 angedacht.

123 Hybridbusse		
Antriebstechnologie	Solo (12 m)	Gelenk (18 m)
seriell	20 Busse <ul style="list-style-type: none"> • 2 Hagener Straßenbahn • 1 MVG - München • 1 HVG - Heidenheim • 3 DVB - Dresden • 5 LVB - Leipzig • 3 SBI - Ingolstadt • 3 WVG - Wolfsburg • 1 AVG - Anklam (Me-VoP.) • 1 BBW - Grevesmühlen (MeVoP) 	51 Busse <ul style="list-style-type: none"> • 14 DVB - Dresden • 2 Hagener Straßenbahn • 4 SWK - Krefeld • 5 HOCHBAHN - Hamburg • 12 SSB - Stuttgart • 1 MVG - München • 13 LVB - Leipzig
leistungsverzweigt		9 Busse <ul style="list-style-type: none"> • 3 Bogestra - Bochum • 1 MVG - München • 4 üstra - Hannover • 1 LVB - Leipzig
parallel	41 Busse <ul style="list-style-type: none"> • 2 TRD - Dortmund • 17 Jasper - Hamburg • 10 SBG - Hamburg • 10 VHH - Hamburg • 2 Üstra - Hannover 	2 Busse <ul style="list-style-type: none"> • 2 Bogestra - Bochum

4 Elektrobusse			
Ladetechnologie	Midi (< 12 m)	Solo (12 m)	Gelenk (18 m)
Induktiv Laden		1 Bus <ul style="list-style-type: none"> • Verkehr-BS - Braunschweig, in Vorbereitung 	
Konduktiv Laden (Kabel)	4 Busse <ul style="list-style-type: none"> • 2 SW Osnabrück • 1 NAHBUS - Wismar • 1 KVG - Kassel 		

Tabelle 1: Übersicht der betrachteten Antriebstechnologien und Fahrzeuggrößen (Stand September 2014)



>> 2. ERSTE ERGEBNISSE

Der gegenwärtige Stand der Begleitforschung wird anhand der definierten Evaluationskriterien für die verschiedenen Bewertungskategorien vorgestellt. Adressiert werden die Themenbereiche Praxistauglichkeit und Einsatzreife, Energieeffizienz, Ökologie und Klimaschutz sowie Wirtschaftlichkeit.

>> 2.1. PRAXISTAUGLICHKEIT UND EINSATZREIFE

>> 2.1.1. LAUFLEISTUNG

Im Rahmen der Arbeitsgemeinschaft mit ihren aktuell 22 in der Langzeitdatenerfassung befindlichen Projekten, konnten seit 2013 tägliche Betriebsdaten für eine Laufleistung von über 10 Millionen Kilometer gesammelt werden (siehe Abbildung 4). Insbesondere für die Hybrid- und Dieselsebusse ist eine gute Datengrundlage gewährleistet. Hier konnte beispielsweise gegenüber den vorherigen Begleitforschungsaktivitäten in den Jahren 2010-2012 mehr als eine Verdreifachung der Laufleistung und damit eine signifikante Verbreiterung der Datenbasis erzielt werden.

Bei den Elektrobussen ist bedingt durch die aktuell noch geringe Fahrzeuganzahl (4 Elektrobusse gegenüber 123 Hybridbussen) und durch die spätere Inbetriebnahme und den damit verbundenen späteren Beginn der Datenerfassung (ab August 2013), die Laufleistung mit rund 66.000 km noch relativ gering, aber auch hier ist der erste Schritt zum Aufbau einer validen Datenbasis gemacht und es ist davon auszugehen, dass die Laufleistung der Batteriebusse mit der Aufnahme des Betriebes von über 20 weiteren Bussen³ im Laufe 2015 dann entsprechend zunimmt. Die neuen rein elektrischen Busse werden überwiegend über induktive und konduktive Ladetechnik, die auf Gelegenheitsnachladung („Opportunity charging“), d.h. auf schnelles Nachladen an (End-) Haltestellen innerhalb weniger Minuten ausgelegt sind, nachgeladen. Damit verfügen diese E-Busse auch über eine größere tägliche Betriebsreichweite, die bei den momentan im Einsatz befindlichen Bussen im Bereich 100-180 km liegt.

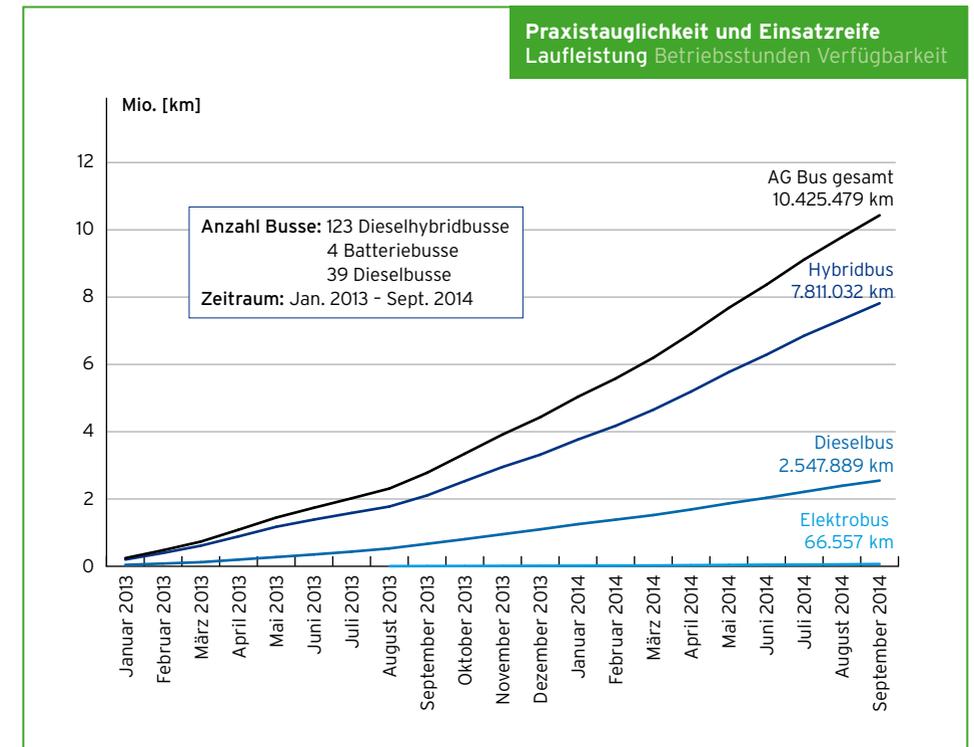


Abbildung 4: Gesamtlauflistung und Laufleistung nach Antriebstechnologie

Insgesamt zeigt sich an der aktuellen erreichten Laufleistung auch der momentane Erfahrungsstand mit rein elektrischen Batteriebussen gegenüber beispielsweise Dieselsebusen. Die Entwicklungen stehen erst am Anfang und es sind die Lernkurven hinsichtlich Zuverlässigkeit, Energieeffizienz, betrieblichem Einsatz etc. für die E-Busse noch zu durchlaufen. Dabei können die mit den Dieselsebusen gemachten Erfahrungen in Bezug auf elektrische Antriebskomponenten hilfreich sein.

³ 5 Batteriebusse in Braunschweig, 2 in Mannheim, 1 Dresden, 2 in Leipzig, 4 in Berlin, 3 Plug-In Hybrid und 3 Batteriebusse in Hamburg, 3 in Hannover

Die in Abbildung 5 dargestellte durchschnittliche monatliche Fahrleistung variiert für Dieselhybridbusse je nach Verkehrsunternehmen zwischen 2.200 und 7.900 Kilometern. Dies spiegelt auch gut 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 (siehe hierzu auch Abschnitt 2.2). Weiterhin spielt die Disponierung, d.h. die Planung der Fahrzeuge, eine Rolle. Hier zeigt sich, dass die Hybridbusse aktuell noch im Schnitt 6 Tage pro Woche (bei einigen Betreibern auch nur 5 Tage) planmäßig eingesetzt werden, während Dieselbusse üblicherweise 6-7 Tage pro Woche im Betrieb sind. Entsprechend liegt die durchschnittliche Monatslaufleistung für die konventionellen Dieselbusse mit im Schnitt ca. 5.040 km etwas über dem entsprechenden Mittelwert für die Hybridbusse, der in der AG Bus vertretenen Busunternehmen gegenwärtig bei rund 4.400 km pro Monat liegt. Hier konnte gegenüber den durchschnittlich ca. 3.300 km, die sich für die Begleitforschung des BMVI im Zeitraum 2010/11 im Mittel ergaben, ein deutlicher Fortschritt der Praxistauglichkeit und Einsatzreife bei den Dieselhybridbussen erzielt werden.

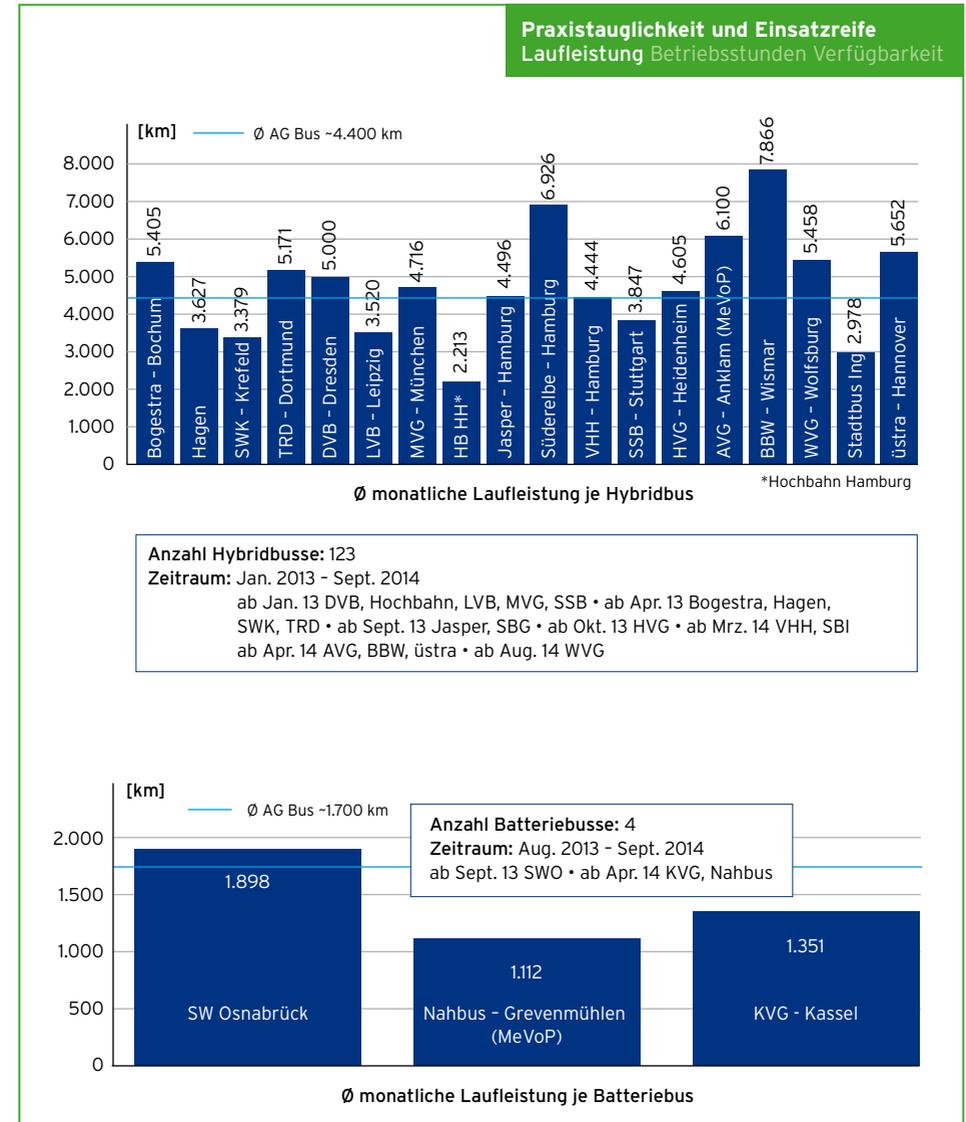


Abbildung 5: Monatliche Laufleistung je Hybrid- und Elektrobus nach Verkehrsunternehmen

Betrachtet man die rein elektrischen Batteriebusse, zeigt sich eine geringere Laufleistung bei den derzeit in der Langzeitdatenerfassung befindlichen Batterie-Midibussen. Bei der Einsatzplanung hat hier entsprechend die modellabhängige tägliche Reichweite der Batteriebusse eine zentrale Rolle. Darüber hinaus hat die Verfügbarkeit einen Einfluss (siehe nächster Abschnitt). Hier wird sich in 2015 zeigen, wie sich die kommenden 12 und 18 m Batteriebusse im Praxiseinsatz bewähren.

>> 2.1.2. VERFÜGBARKEIT

Die Verfügbarkeit der Dieselhybridbusse liegt in Bezug auf die eingesetzten Antriebstechnologien und Fahrzeugklassen (12 und 18 m) bei bis zu 91% (siehe Abbildung 6). Damit wird im Fall der Solobusse mit Parallel-Hybridantrieb eine mit dem konventionellen Diesibus vergleichbare Verfügbarkeit, die bei >90% liegt, erreicht. Die anderen Hybridantriebstechnologien zeigen im zeitlichen Verlauf seit Anfang 2013 ebenfalls positive Entwicklungen, weisen aber noch weiteres Optimierungspotential auf. Die Indikatorbalken in Abbildung 6 geben die monatlichen Min- und Max-Werte je Antriebstechnologie wieder, um einen Eindruck über die Bandbreite der erzielten Verfügbarkeiten zu vermitteln.

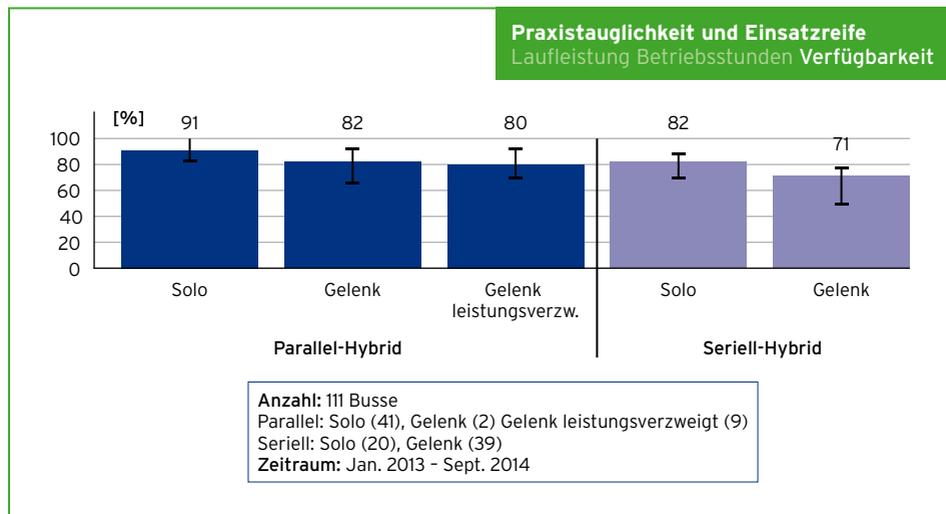


Abbildung 6: Verfügbarkeit nach Fahrzeugklasse und Antriebstechnologie

Entsprechend Abbildung 7 ergibt sich über alle Dieselhybridbusse eine mittlere Verfügbarkeit von gegenwärtig 82%. Erwähnenswert ist, dass der Anteil an hybridspezifischen Defekten mit rund 6 % der geplanten Betriebsstunden niedriger ausfällt als der Anteil der Ausfälle (9%), der auf Komponenten, die nicht dem innovativen Antriebsstrang zuzuordnen sind (sonstiger Defekt), zurückzuführen ist. Der Anteil Wartung ist in etwa vergleichbar mit dem Anteil bei den konventionellen Diesebussen.

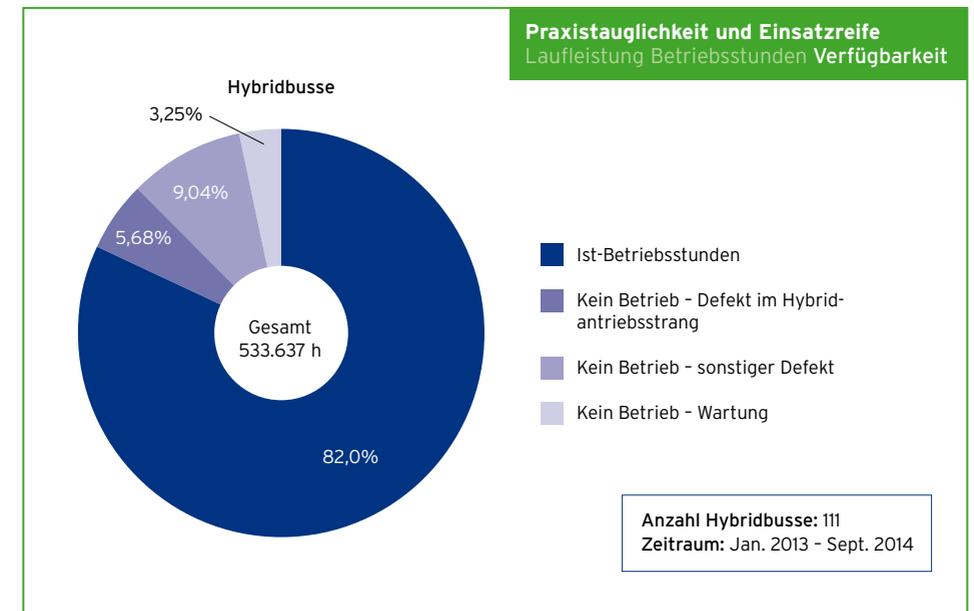


Abbildung 7: Verteilung Betriebsstatus Dieselhybridbusse

Einige der Hybridbusse sind bereits 4 Jahre in Betrieb, insofern wird es im weiteren Verlauf der Monitorings interessant sein zu beobachten, wie sich die Verfügbarkeit mit fortschreitender Einsatzdauer entwickelt. Eventuell auftretende Mängel sind zu beheben und Aspekte wie Ersatzteilversorgung und -verfügbarkeit werden voraussichtlich an Bedeutung gewinnen.

Die Verfügbarkeit der Batteriebusse liegt aktuell bei 67% (siehe Abbildung 8). Hier fallen, bedingt durch die momentan noch geringe Stückzahl (4 Midibusse) und den gegenüber Dieselhybridbussen verkürzten Betrachtungszeitraum (seit August 2013), Sondereffekte (Batteriekonditionierung, Ersatzteilverfügbarkeit nach Verkehrsunfall etc.) bei einzelnen Fahrzeugen besonders ins Gewicht. Die beiden anderen Busse weisen eine Verfügbarkeit von durchschnittlich 78 bzw. 79% auf und zeigen damit im Vergleich zur durchschnittlichen Verfügbarkeit der Dieselhybridbusse bereits ähnliche Verfügbarkeitswerte.

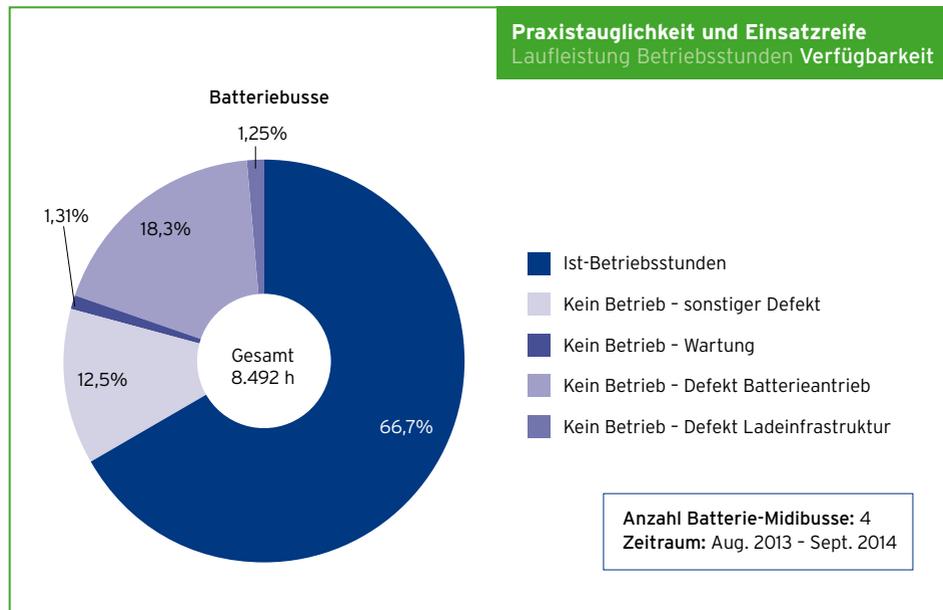


Abbildung 8: Verteilung Betriebsstatus Batteriebusse

Zusätzlich zu den in Abbildung 8 dargestellten Batterie-Midibussen weist ein seit März 2014 im Einsatz befindlicher 12 m Batteriebus mit induktiver Nachladung nach ersten Auswertungen eine ähnliche Verfügbarkeit (ca. 80%) auf.

Die Beobachtung der Entwicklung der Verfügbarkeit, gerade auch vor dem Hintergrund der zusätzlich in den Linieneinsatz gehenden Batteriebusse, wird ein wesentlicher Inhalt der weiteren Evaluationsaktivitäten sein.

Praxistauglichkeit und Einsatzreife:

- In der aktuellen Begleitforschung wird eine deutliche Verbreiterung der Datenbasis gegenüber früheren Begleitforschungsaktivitäten in 2010-12 erzielt (seit Jan. 2013 Betriebsdaten für 10 Mio. km; 123 Hybridbusse, 39 Dieselbusse)
- Der Aufbau der Datenbasis für Batteriebusse hat begonnen (seit Aug. 2013 4 Batterie-Midibusse)
- Dieselhybridbusse weisen eine steigende monatliche Laufleistung auf (aktuell ca. 4.400 km/ Monat vs. 3.300 km/ Monat in 2010/11), Dieselreferenz bei rund 5.000 km
- Die Verfügbarkeit der Dieselhybride beträgt je nach Antriebstechnologie und Fahrzeugklasse bis zu 91%. Die Solo Parallel-Hybridbusse erreichen damit bereits den Referenzwert der Dieselbusse (>90%). Über alle Dieselhybridbusse hinweg entwickelt sich die Verfügbarkeit im Zeitverlauf insgesamt positiv und nähert sich im Mittel mit 82% dem konventionellen Dieselbus weiter an. Die Ausfallgründe der Hybridbusse liegen mehrheitlich im konventionellen Fahrzeugteil (9% vs. 6% Hybridantrieb).
- Die Verfügbarkeit der Batterie-Midibusse liegt Stand September 2014 bei Ø 67%, teilweise bedingt durch Einmaleffekte. Zwei der vier Fahrzeuge liegen bereits bei ca. 80%.
- Die Entwicklung der Verfügbarkeit ist gerade im Fall der Batteriebusse mit steigender Lernkurve und der Inbetriebnahme zusätzlichen Fahrzeugen im weiteren Verlauf der Begleitforschung zu beobachten.



>>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 sowie 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.

>> 2.2.1. ROUTENCHARAKTERISTIK UND KLIMATISCHE BEDINGUNGEN

Der Kraftstoff- bzw. Energieverbrauch von Nahverkehrsbussen wird entscheidend von den Einsatzbedingungen bestimmt. Diese sind im Wesentlichen die Routencharakteristik und die klimatischen Bedingungen.

Die Routencharakteristik wird zum einen bestimmt durch die mittlere Reisegeschwindigkeit, die u. a. vom Haltestellenabstand, Fahrplanvorgaben und dem Verkehrsfluss bzw. der Verkehrsdichte abhängt. Abbildung 9 stellt die Bandbreite der linien- bzw. netzbezogenen Durchschnittsgeschwindigkeiten bei den beteiligten Verkehrsunternehmen dar. Sie reicht von 14,7 km/h in Osnabrück bis zu 33,5 km/h in Grevesmühlen in Mecklenburg-Vorpommern. Im Mittel beträgt die Reisegeschwindigkeit in der AG Bus gut 19 km/h und liegt damit wie auch die Mehrheit der 26 betrachteten Linien bzw. Liniennetze in der von der UITP⁴ entwickelten SORT⁵ Klassifizierung im Bereich von SORT 2 mit Geschwindigkeiten zwischen 15 und 21,4 km/h.

Zum anderen bestimmt die Linientopographie, d. h. das Höhenprofil der Linie mit entsprechenden Steigungs- und Gefällestrecken, die Routencharakteristik. Die Anzahl der Höhenmeter, die pro Kilometer auf den unterschiedlichen Linien bewältigt wird, variiert in einer Bandbreite von 3-18 Hm/km (siehe Abbildung 10). Während in Hannover (üstra) kaum relevante Steigungen vorhanden sind, führt die relativ anspruchsvolle Topographie in Stuttgart dazu, dass auf der Linie 43 über 18 Höhenmeter pro Kilometer überwunden werden.

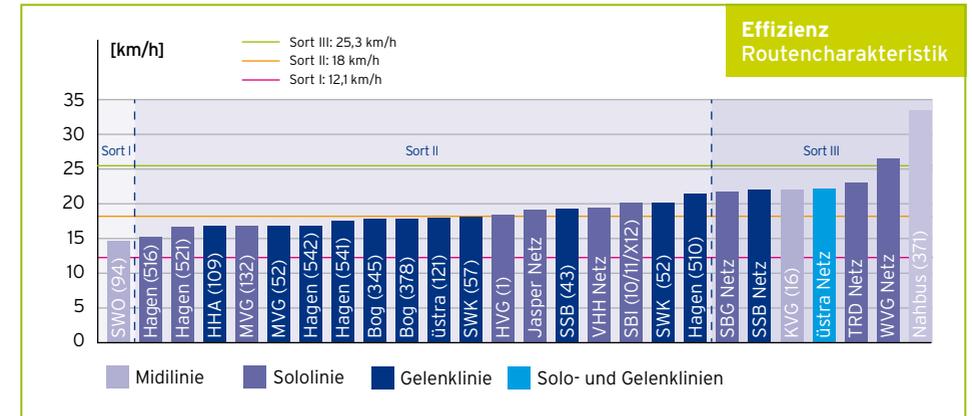


Abbildung 9: Linien- bzw. Netzspezifische Durchschnittsgeschwindigkeit je Verkehrsunternehmen

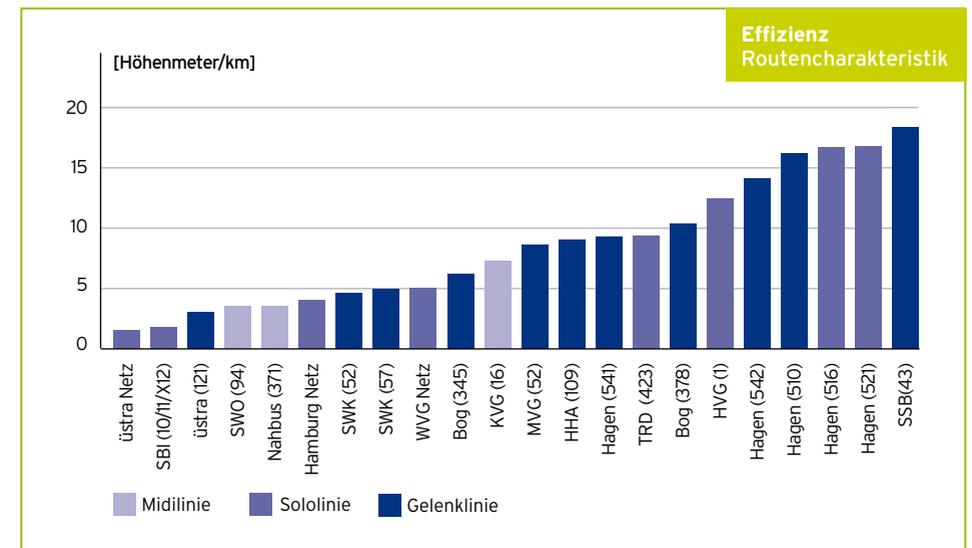


Abbildung 10: Linien- bzw. netzspezifische Topographie je Verkehrsunternehmen

4 Union Internationale des Transport Public

5 Standardised On-Road Test cycle

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 und/ oder Klimaanlage wiederum unmittelbare Auswirkungen auf den Energieverbrauch des Fahrzeuges hat. Entsprechend Abbildung 11 schwankte die mittlere Monatstemperatur zwischen -1°C und $+22^{\circ}\text{C}$ in den Einsatzgebieten. Die Extreme im Sommer und Winter sind im Betrachtungszeitraum nicht besonders ausgeprägt ausgefallen, insbesondere der Winter 2013/14 kann als relativ mild bezeichnet werden.

Darüber hinaus hat auch der/die Fahrer/in einen signifikanten Einfluss auf den Energieverbrauch eines Busses. Dieser wird hier aber nicht näher betrachtet und bleibt weiteren Untersuchungen vorbehalten.

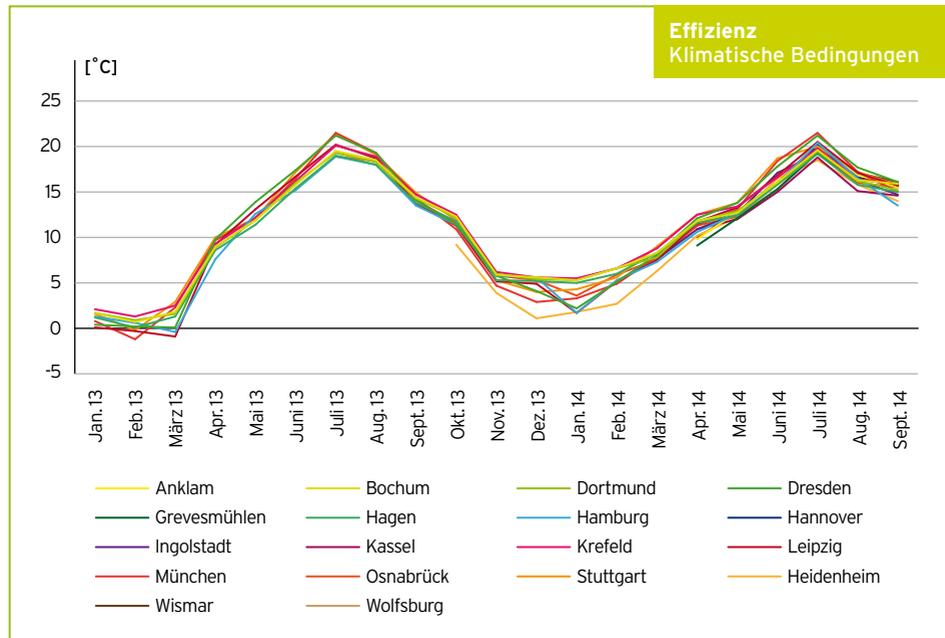


Abbildung 11: Mittlere Monatstemperatur im jeweiligen Einsatzgebiet der Verkehrsunternehmen

>> 2.2.2. ERZIELTE KRAFTSTOFFEINSPARUNG

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

Seit Anfang 2013 konnte eine mittlere Kraftstoffeinsparung von 14% über alle Busse und Einsatzbedingungen erzielt werden. Dabei wird auf allen betrachteten Linien eine Kraftstoffeinsparung zwischen 1 und 29% erzielt. Dies stellt eine klare Verbesserung gegenüber den im Zeitraum 2010-12 ermittelten mittleren Kraftstoffeinsparungen dar. Damals ergaben sich zwar bereits Einsparungen zwischen 2 und 21% auf der Mehrzahl der analysierten Linien, aber sowohl bei den BMUB Begleituntersuchungen in 2011/12 als auch bei den BMVI geförderten Projekten in 2010/11 wurde auf 3 von 15 bzw. auf 4 von 16 untersuchten Linien ein teilweise nicht unerheblicher Mehrverbrauch ($>10\%$) beobachtet. Hauptgründe hierfür waren seinerzeit 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) sowie die Tatsache, dass die Hybridbusse aufgrund ihres technologischen Neuheitsgrades noch nicht optimiert waren, z. B. hinsichtlich Energieeffizienz. Eine Optimierung konnte entsprechend auf Basis der seither gesammelten Erfahrungen erfolgen. So wurden von den Herstellern zwischenzeitlich teilweise mehrere Optimierungspakete implementiert, die sowohl Software als Hardwaretechnische Maßnahmen beinhalten. So verbesserte sich beispielsweise für eine Route der Kraftstoffverbrauch um 21 Prozentpunkte (12% Mehrverbrauch in 2010/11 zu nun 9% Kraftstoffeinsparung) für denselben seriellen Gelenkhybridbustyp.

Demnach ergeben sich für Dieselhybridbusse die in Abbildung 12 nach Antriebstechnologie und Busgröße differenzierten mittleren Kraftstoffeinsparungen, die im Bereich 7-25% liegen. Der Indikatorbalken gibt dabei die Bandbreite der mittleren auf den einzelnen Linien ermittelten Kraftstoffeinsparungen an. Je Busgröße und Antriebstechnologie wurden 4 bis 7 Linien ausgewertet. Der Wert für Gelenkbusse mit Parallel-Hybridantrieb beinhaltet auch Werte für Gelenkbusse mit leistungsverzweigten Hybridantrieb.

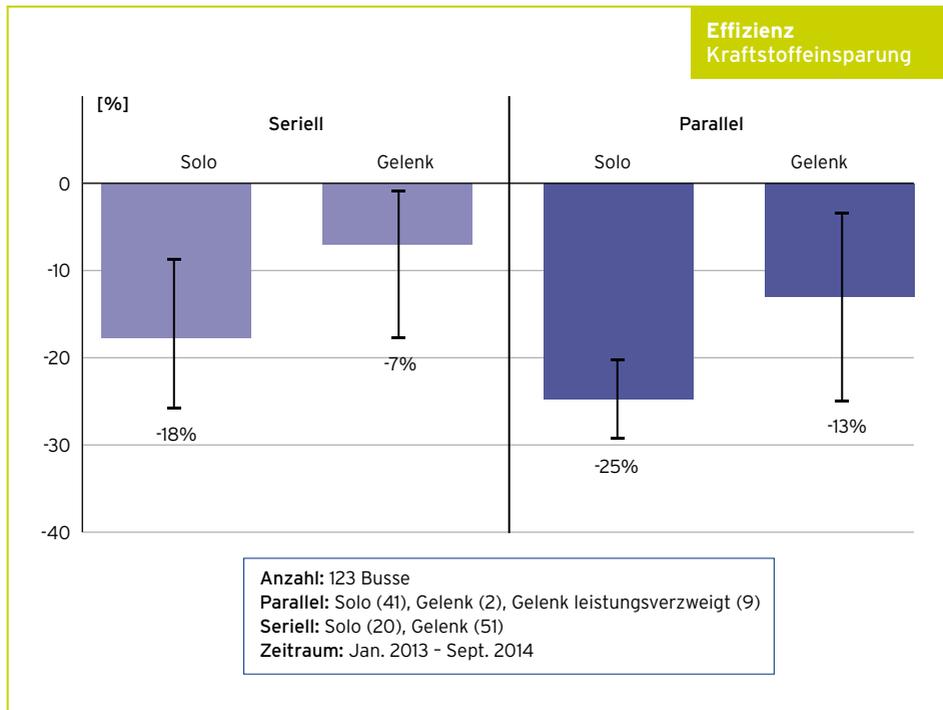


Abbildung 12: Erzielte mittlere Kraftstoffeinsparung nach Antriebstechnologie

>>2.2.3. EINFLUSS HEIZUNG UND KLIMATISIERUNG AUF ENERGIEVERBRAUCH

Die Bewertung des Energieverbrauchs ist ein weiteres Beispiel für die Notwendigkeit einer ganzheitlichen Betrachtungsweise. Neben der Routencharakteristik, die im Wesentlichen den Energieverbrauch für den längsdynamischen Fahrbetrieb des Fahrzeuges bestimmt, ist die Berücksichtigung der vom Fahrbetrieb überwiegend unabhängigen Nebenaggregate ebenfalls von zentraler Bedeutung. Hier ist im Besonderen die Klimatisierung des Fahrgastraumes bei entsprechend niedrigen und hohen Außentemperaturen im Winter bzw. Sommer relevant. Dies gilt sowohl für die Hybridbusse wie für die rein elektrischen Busse.

Abbildung 13 zeigt beispielhaft für zwei serielle Dieselhybrid- und zwei konventionelle Dieselbusse (Solo) auf einer Linie in Rhein-Ruhr den gemittelten, linienbezogenen Kraftstoffverbrauch im Jahresverlauf 2013/14. Für den Hybridbus ist eine relativ gute Korrelation des mittleren Kraftstoffverbrauchs mit der mittleren Tagestemperatur zu erkennen, sowohl während der warmen Sommermonate (Juni bis August) und als auch während der kälteren Wintermonate (November bis Januar). Für den konventionellen Dieselbus ist zu berücksichtigen, dass dieser über keine Fahrgastklimaanlage verfügt und sich daher auch keine signifikante Änderung des Dieserverbrauchs während der Sommermonate zeigt. Beide Fahrzeuge verfügen über eine 35 kW Zusatzheizung und der Hybridbus hat zusätzlich eine 24 kW Klimaanlage.

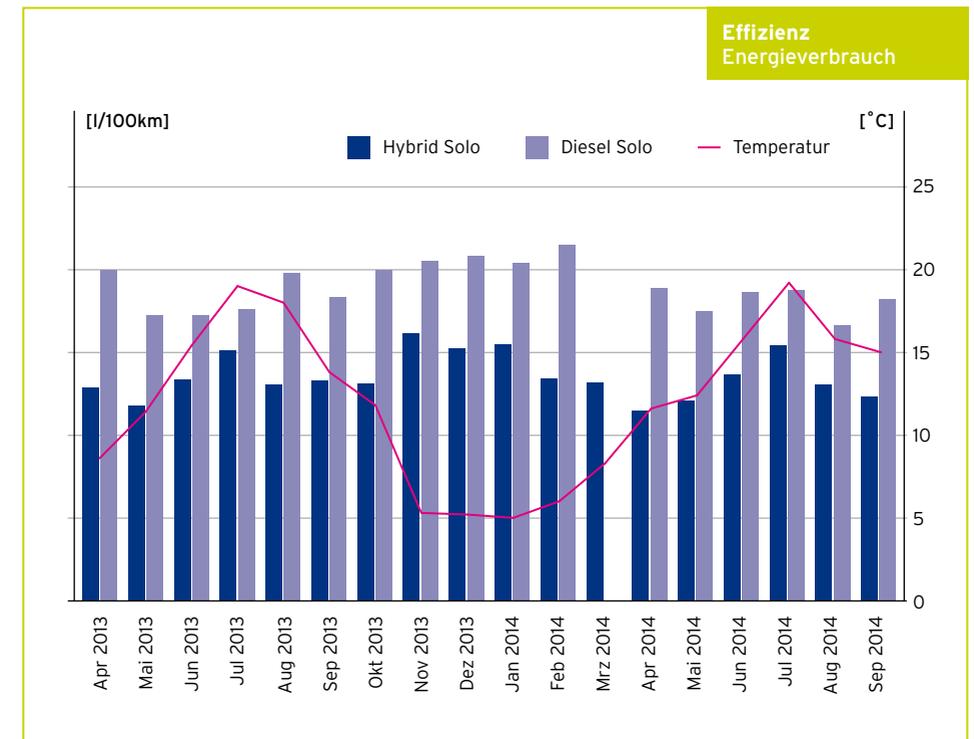


Abbildung 13: Mittlerer Kraftstoffverbrauch serieller Hybrid- und konventioneller Dieselbus (Solo) in Korrelation zu mittleren Tagestemperatur

Für die rein elektrischen Batteriebusse stellt gerade die Heizung des Fahrgastraums in den Wintermonaten eine Herausforderung dar. Die aktuell in der Langzeitdatenerfassung befindlichen Batterie-Midibusse verfügen alle über eine Dieselmotorschheizung. Dies hat den Vorteil, dass die Reichweite der Fahrzeuge im Winter nicht durch den zusätzlichen Energiebedarf für die Fahrgastraumheizung eingeschränkt wird. In Abbildung 14 ist zu erkennen, dass der Energiebedarf der Heizung in den Monaten November bis Januar in einer vergleichbaren Größenordnung zum Fahrtriebsenergiebedarf liegt. Das heißt, würde die für die Heizung benötigte Energie aus der Batterie entnommen werden und ist wie in diesem Fall keine Nachladung über den Tag vorgesehen, halbiert sich die Reichweite des Batteriebusse während der kalten Jahreszeit. Bei rein elektrischen Bussen ist zu beachten, dass prinzipbedingt eben keine Abwärme aus einem Verbrennungsmotor „gratis“ zur Verfügung steht, wie es bei einem Dieselmotor der Fall ist. Insofern muss sämtliche Heizungsenergie gesondert erzeugt werden. Im Dezember 2013 beispielsweise lag der streckenbezogenen Dieserverbrauch der 30 kW Fahrgastraumheizung des Batterie-Midibusses bei ca. 9,5 l Diesel/100 km. Bei einem Bus mit Dieselmotor liegt der zusätzliche Dieselbedarf in einer Größenordnung von 1-2 l/100 km und damit wesentlich niedriger. Die Monatsmitteltemperatur war mit 5,3°C nicht besonders niedrig, d.h. in Monaten mit niedrigerer Außentemperatur ist hier mit noch höheren Verbräuchen zu rechnen. Im Jahresmittel benötigt der betrachtete Batteriebus ein Energieäquivalent von ca. 40% des Fahrenergieverbrauchs für die Beheizung des Busses. Der zusätzliche Energiebedarf der elektrischen Klimaanlage (32 kW) ist im Juli 2014 zu erkennen. Er fällt mit einem Mehrverbrauch von ca. 17% aber im Vergleich zum Heizenergiebedarf im Winter deutlich geringer aus.

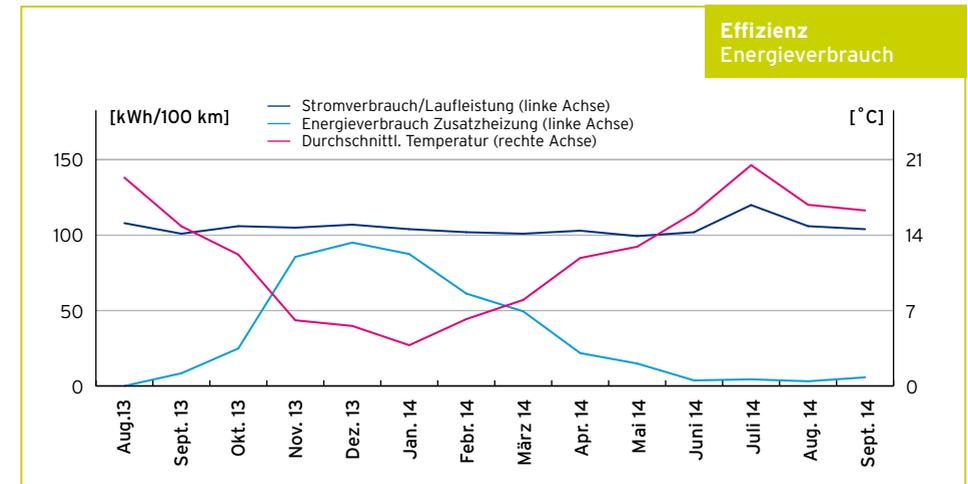


Abbildung 14: Batteriebus – Betrachtung Energieverbrauch für Fahrtrieb und Heizung Fahrgastraum

Die Batteriebusse, die beispielsweise in Braunschweig eingesetzt werden, verfügen über eine rein elektrische Fahrgastraumheizung, auch die Klimaanlage wird elektrisch betrieben. Die Auswirkungen auf den Energieverbrauch werden Teil der weiteren Untersuchungen sein.

Bisher ist noch keine direkte Gegenüberstellung des Energieverbrauchs von Batterie- und Dieselmotorschheizungen möglich, da bei den drei bisher datenliefernden Verkehrsunternehmen entweder keine Dieselmotorschheizer auf der gleichen Linie zum Einsatz kommen (z.B. in Osnabrück) oder bisher keine auf die gleiche Linie bezogenen Verbrauchsdaten für Dieselmotorschheizer vorliegen. Die Betrachtung des Energieverbrauchs wird sich dabei an der VDV Mitteilung 2316 „Empfehlung zur Ermittlung des spezifischen Primärenergieverbrauchs und der Gesamtemissionen von Bussystemen“ orientieren, die im Sinne der in der AG Bus angestrebten ganzheitlichen Betrachtung auf der Berücksichtigung des gesamten Lebenszyklus basiert.

Energieeffizienz

- **Dieselhybrid:** Es werden Kraftstoffeinsparung von 014% (1%-29%) erreicht, dabei werden Einsparungen auf allen untersuchten Linien erzielt. Dies stellt eine Verbesserung gegenüber der Begleitforschung 2010-12 dar: damals wurde auf jeder 5. Linie ein Mehrverbrauch ermittelt. Seither wurden verschiedene Optimierungsmaßnahmen implementiert. (Beispiel: aus 12% Mehrverbrauch wurde für gleichen Bustyp 9% Einsparung auf derselben Linie). Betrachtet man die einzelnen Antriebstechnologien, so liegen die Einsparungen im Bereich 7-25%
- **Batteriebusse:** Die Fahrgastraumheizung im Winter führt zu einem Mehrverbrauch, der in einer vergleichbaren Größenordnung wie der Energieverbrauch des Fahrantriebs liegt. Abhängig von der Außentemperatur kann er auch darüber liegen.

>> 2.3. ÖKOLOGIE UND KLIMASCHUTZ

Vor dem Hintergrund der angestrebten Senkung der CO₂-Emissionen im Verkehrssektor, einer wachsenden Urbanisierung und den geltenden gesetzlichen Regelung zur Einhaltung der EU Grenzwerte hinsichtlich Schadstoff- und Lärmbelastungen, stehen Städte und Kommunen vor großen Herausforderungen. So besteht für den Verkehr in Ballungszentren ein hoher Innovationsdruck. Hier können innovative, emissionsarme Antriebe im busbasierten ÖPNV entsprechende Beiträge leisten, gerade im Hinblick auf eine Verringerung der Treibhausgas, Schadstoff- und Lärmemissionen.

>> 2.3.1. TREIBHAUSGAS- UND SCHADSTOFFEMISSIONEN

Langzeitdatenerfassung

Bisher wurden durch den Einsatz der in der Langzeitdatenerfassung befindlichen Dieselhybridbusse mehr als 1.000 Tonnen Treibhausgase (THG, gemessen in CO₂ Äquivalent) vermieden. Dies entspricht mehr als einer Verdoppelung der während der Begleitforschungsaktivitäten in 2010-2012 vermiedenen Treibhausgase (~400 t THG). Durch den reduzierten Kraftstoffverbrauch der Dieselhybridfahrzeuge gegenüber konventionellen Fahrzeugen konnten in 2013/14 bisher 364.000 Liter Diesel eingespart werden. Damit kann ein konventioneller Solobus bei einem durchschnittlichen Verbrauch von 40 l/100 km eine Strecke von mehr als 910.000 km zurücklegen.

Da die Batterie-Midibusse bisher in sehr speziellen Linienkontexten eingesetzt werden, liegen derzeit noch keine direkt vergleichbaren Verbrauchsdaten von Dieselnissen vor. Sobald dies der Fall ist, kann eine Analyse der vermiedenen Treibhausgase auch für die Batteriebusse vorgenommen werden. Dabei spielt die Bereitstellung der genutzten elektrischen Energie die wesentliche Rolle. Strom der aus erneuerbaren Ressourcen erzeugt wird, weist hier entsprechende Vorteile auf gegenüber Strom, der aus fossilen Energieträgern wie Kohle oder Erdgas gewonnen wird. Diese Betrachtung ist im weiteren Verlauf der Begleitforschung vorgesehen.

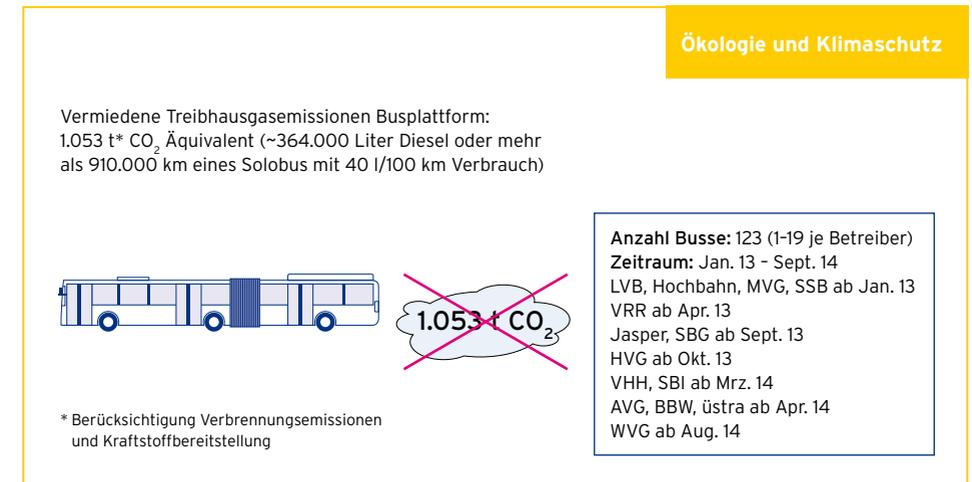


Abbildung 15: Eingesparte Treibhausgasemissionen AG Bus

Detaillierte Messuntersuchungen an Solo- und Gelenkhybridbussen

Im Rahmen der Begleitforschung zum Einsatz von Bussen mit alternativen Antrieben im Verkehrsverbund Rhein-Ruhr sind die Abgasemissionen der unterschiedlichen Fahrzeuge in einem standardisierten Verfahren vom TÜV NORD und dem ika der RWTH Aachen auf acht als für das VRR Netz repräsentativ ausgewählten Strecken gemessen worden. Dazu sind die verschiedenen Fahrzeuge mit portabler Emissionsmesstechnik zur Bestimmung der Bestandteile der Schadstoffemissionen ausgerüstet worden. Flankierend dazu sind die

fahrzeugspezifischen Betriebsdaten mit Hilfe von elektrischen Leistungsmessgeräten sowie mit Abgriffen der Onboard-Diagnostik aufgezeichnet worden. Die umfassende Datenerfassung ermöglicht eine detaillierte Auswertung der Betriebsweise der jeweiligen Hybridkonzepte. Neben den aggregierten Kerndaten lassen sich so Haltestellenan- und -abfahrten und andere Einzelereignisse analysieren. Zusammenfassend lassen sich die bisher gewonnenen Messergebnisse in gemittelter Form wie folgt darstellen (siehe Abbildung 16). Die Fehlerindikatoren zeigen dabei die Extrema der Messfahrten auf, d. h. die Fahrten mit den höchsten bzw. niedrigsten Emissionswerten um die Bandbreite des Emissionsverhaltens der einzelnen Fahrzeugtypen aufzuzeigen.

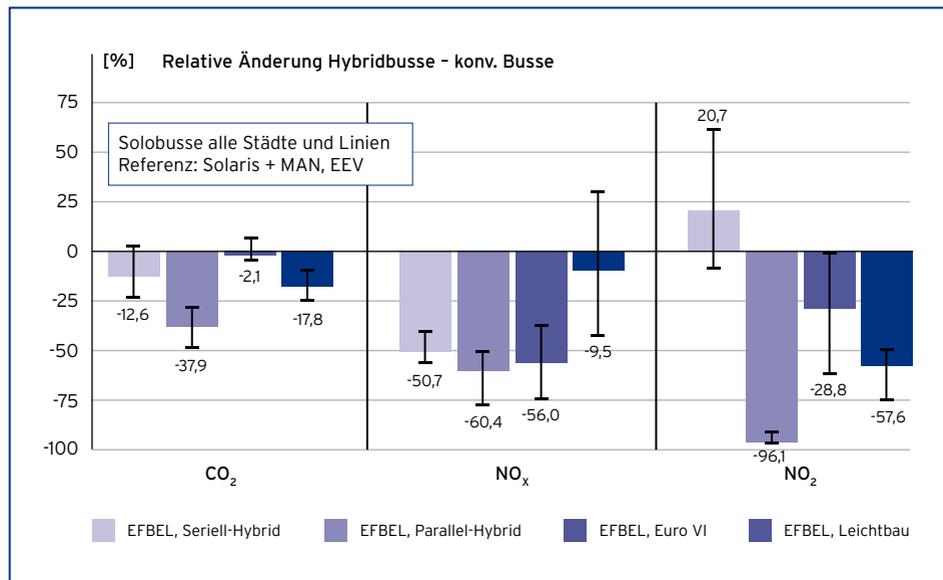


Abbildung 16: Solobusse – Abgasemissionen EFBEL Messuntersuchungen

Im Rahmen der Untersuchung der Solobusse sind zwei Dieselhybridbusse, ein konventioneller Dieselbus, der die neue Euro VI - Abgasnorm erfüllt, sowie ein Leichtbaubus vermessen worden. Die Hybridbusse und der Leichtbaubus erfüllen die Euro V/EEV⁶ Norm. Als Referenz ist der Mittelwert der Messungen zweier Dieselbusse angenommen worden, die zusammen einen Großteil der Flotte in Deutschland bilden.

Allen Fahrzeugen ist gemein, dass sie im Mittel einen geringeren Ausstoß an Kohlendioxid im Vergleich zu konventionellen Dieselfahrzeugen nach Euro V - EEV Abgasnorm aufweisen. Einzelne Fahrten zeigen jedoch auch, dass sich - je nach Verkehrssituation und Streckenprofil - auch erhöhte Emissionswerte ergeben können. Für die beiden Hybridfahrzeuge ergeben sich starke Reduktionen bei den Kohlendioxidemissionen (CO₂), wobei das Parallelkonzept Vorteile gegenüber dem seriellen Hybrid zeigt. Da die Emissionen von Kohlendioxid - unter Vernachlässigung des verschwindend geringen Kohlenmonoxidausstoßes - proportional zum Kraftstoffverbrauch sind, lassen sich so auch analoge Aussagen über die mögliche Kraftstoffeinsparung treffen.

Bei den NO_x-Schadstoffemissionen zeigt sich, dass sowohl die Hybridfahrzeuge als auch das Fahrzeug nach Euro VI - Norm signifikante Reduktionen in einer Größenordnung von 50-60% aufweisen. Das Leichtbau-Fahrzeug, welches im Kern ein Euro V - EEV - Fahrzeug mit deutlich verringertem Gesamtgewicht ist, emittiert auf Grund seines insgesamt geringeren Kraftstoffverbrauchs ebenfalls weniger Stickstoffoxide (im Mittel ca. -10%, aber mit großer Streubreite). Hervorzuheben ist jedoch hier, dass die Hybridfahrzeuge, die nach Euro V - EEV zertifiziert sind, bereits Werte erreichen, die mit konventionell angetriebenen Fahrzeugen erst unter Einsatz deutlich aufwändigerer Abgasnachbehandlungstechnik zur Erfüllung der Euro VI-Norm realisierbar sind.

Für die Stickstoffdioxid-Emissionen ergibt sich ein uneinheitliches Bild bei den relativen Vergleichswerten. Hier spielt die verwendete NO_x-Reduktionstechnologie eine Rolle. Der serielle Hybrid verwendet eine Abgasrückführung (AGR), während der Parallel-Hybrid die SCR⁷ Technologie nutzt. Alle Fahrzeuge unterschreiten die jeweils geltenden Grenzwerte jedoch erheblich.

⁶ Enhanced Environmental-friendly Vehicle

⁷ Selective Catalytic Reduction (Selektive katalytische Reduktion)

Für die Gelenkbusse ist zusätzlich zu den einzelnen Fahrzeugen noch ein Wert für die Emissionsmittelwerte aus den Messungen des Vorgängerprojektes VRR angegeben. In diesem aggregierten Wert sind jedoch alle Fahrzeuge der vorigen Messkampagne enthalten, so dass er eine grobe Einordnung ermöglicht, für direkte Vergleiche aber letztlich nur sehr bedingt geeignet ist.

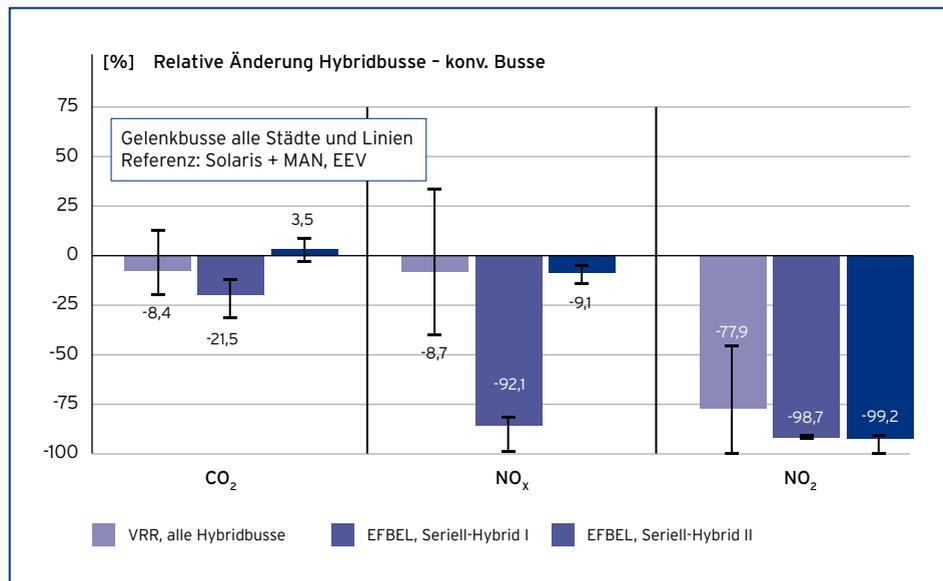


Abbildung 17: Gelenkbusse – Abgasemissionen EFBEL Messuntersuchungen

Die untersuchten Hybridbusse zeigen stark unterschiedliche Entwicklungsstände. Während bei dem seriellen Hybridbus I durchgängig verringerte CO₂-Emissionen sowie bis an die Nachweisgrenze verringerte Stickstoffoxidemissionen messbar sind, zeigt der serielle Hybridbus II z.T. erhöhte Kohlendioxidausstöße. Die Wirksamkeit der Abgasnachbehandlung im Hinblick auf NO_x ist auch unterschiedlich ausgeprägt. Durchgängig werden die NO₂-Emissionen deutlich überproportional reduziert. Hier zeigen sich klare Vorteile gegenüber den konventionellen Diesel Bussen, die die Euro V - EEV Norm erfüllen.

Im weiteren Verlauf der Begleitforschungsaktivitäten ist geplant, zusätzlich einen parallel Solohybridbus Euro VI, einen Brennstoffzellenbus sowie einen batterieelektrischen Bus zu vermessen. Bei den beiden zuletzt genannten Bussen liegt der Fokus entsprechend nur auf dem Energieverbrauch. Weiterhin werden die Ergebnisse der Messungen der Feinstaubemissionen (PM) ergänzt.

Für die Betrachtung der Schadstoffemissionen ist hier die Strombereitstellung mit zu berücksichtigen. Elektrobusse zeichnen sich zwar durch lokal „Null Emissionen“ im eigentlichen Betrieb aus, die genutzte elektrische Energie muss aber zuerst erzeugt werden. Letztlich kommt es hier zu einer Verschiebung der Emissionen aus der Nutzung des Busses hin zur Energiebereitstellung. Daher sind die Schadstoffemissionen in Abhängigkeit der gewählten Stromerzeugungsrouten auf Basis erneuerbarer und nicht erneuerbarer Ressourcen zu betrachten. Dieser Sachverhalt ist im Rahmen der weiteren Untersuchungen noch näher im Detail zu betrachten und verdeutlicht nochmals wie wichtig es ist, eine ganzheitliche Betrachtungsweise bei der Evaluation anzuwenden.

>> 2.3.2. GERÄUSCHEMISSIONEN

Die umfangreichen Messungen der RWTH Aachen im Projekt EFBEL zu Lärmemissionen zeigen für die vermessenen Hybridbusse klare Vorteile gegenüber konventionellen Dieseln auf. 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 BlmschG⁸.

Bei der Bewertung der Einleitung von Lärm in die städtische Umgebung durch Stadtbusse ist die Bestimmung des Außengeräusches ausschlaggebend. Zur Messung der Außengeräusche wurden auf der ika-eigenen Teststrecke auf einem genormten Testasphalt Haltestellenan- und -abfahrten bei Teil- und Vollast sowie Vorbeifahrten mit konstanten Geschwindigkeiten für verschiedene Dieselhybrid- und konventionelle Dieseln gemessen. Bei den Hybridbussen, bei denen die Möglichkeit gegeben war, sind die Manöver auch mit erzwungenem rein elektrischem Fahrmodus (ZEV) durchgeführt worden.

⁸ Bundes-Immissionsschutzgesetz

Zur Kategorisierung der Messungen in diesem Projekt wird wie in Abbildung 18 dargestellt, eine genauere Abbildung der psychoakustischen Zusammenhänge gewählt und angewendet. An Stelle von bewerteten Schalldruckpegeln wird die linear skalierte Lautheit der Geräuscheignisse berechnet.

Zur Beurteilung von akustischen Einzelereignissen hat sich die Bestimmung des 5%-Perzentils der Lautheit bewährt. So lässt sich das komplexe Geräuschverhalten z. B. einer Haltestellenabfahrt mit einem psychoakustisch korrekt ermittelten Einzahlwert beschreiben.

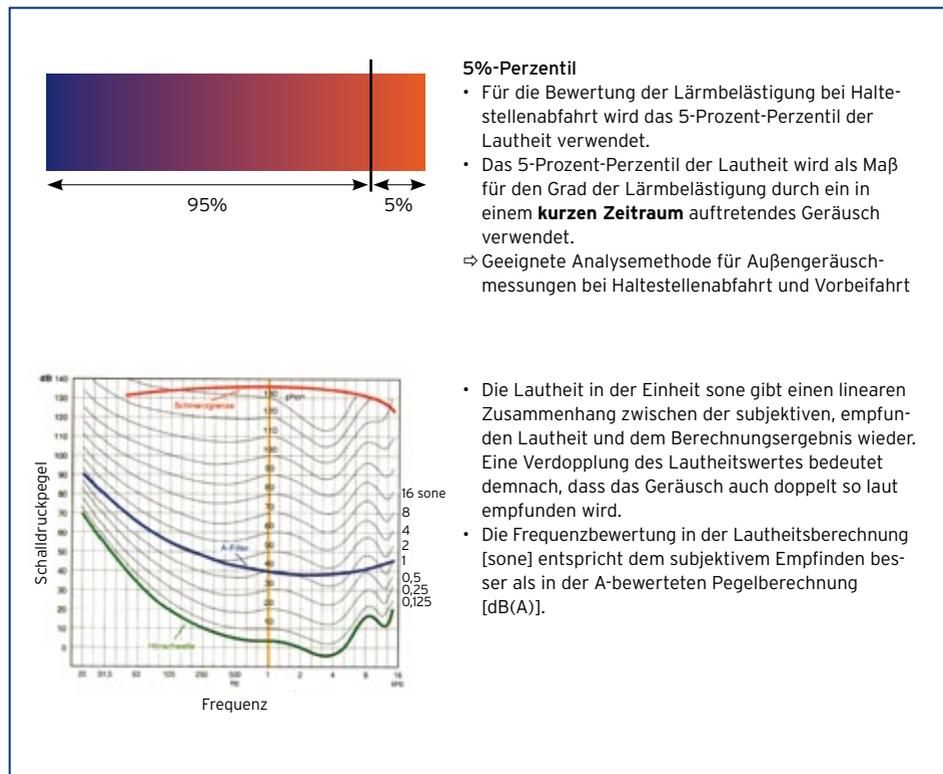


Abbildung 18: Geräuschemissionen – Methodik Lautheitsbewertung in EFBEL

In Tabelle 2 sind die Ergebnisse der Geräuschemessungen mit den jeweiligen Lautheitswerten in sone dargestellt. Zusätzlich zu den Messungen im Projekt EFBEL sind Messungen im europäisch geförderten Projekt CIVITAS Dynamo durchgeführt worden, deren Ergebnisse zu Vergleichszwecken mit aufgeführt werden.

Aufbau	Projekt	Antrieb	Abfahrt Teillast [sone]		Abfahrt Volllast [sone]
			HEV ¹	ZEV ²	
Solo	VRR I	Hybrid	21,06		27,99 ³
Solo	VRR I	Hybrid		17,15	43,76
Solo	EFBEL	Hybrid	23,21		35,18
Solo	EFBEL	Hybrid	29,12		31,46
Gelenk	CiVITAS	Hybrid		21,18	38,91
Solo	CiVITAS	Hybrid	29,40		36,37
Gelenk	EFBEL	Hybrid		25,21	46,67
Solo	EFBEL	Konventionell	53,34		53,50
Solo	CiVITAS	Konventionell	54,40		52,95
Solo	EFBEL	Konventionell	56,65		58,75
Gelenk	CiVITAS	Konventionell	58,55		58,55
Gelenk	VRR I	Hybrid	61,54 ⁴		56,52 ⁴
Solo	EFBEL	Konventionell	53,15		65,64
Gelenk	VRR I	Hybrid	60,79	32,37	74,53
Gelenk	VRR I	Konventionell	60,91		65,81
Gelenk	VRR I	Konventionell	62,70		67,31

1 Abfahrt im Hybridmodus (mit eingeschaltetem Dieselmotor)

2 Abfahrt im Null-Emission-Modus (rein elektrisch, bei ausgeschaltetem Dieselmotor)

3 Messung bei geschlossener Schneedecke

4 Messung bei feuchter Fahrbahn

Tabelle 2: Übersicht Ergebnisse der Geräuschemissionen

Es 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 von 53,34 sone auf 17,15 sone beobachten, ca. 1/3 des Wertes des konventionellen Vergleichsfahrzeuges.

Die hier getroffenen Aussagen zu Lautheitsbewertung der Dieselhybridbusse im Zero Emission Betrieb, d. h. im rein elektrischen Betrieb mit ausgeschaltetem Dieselverbrennungsmotor, sind prinzipiell auch auf Batteriebusse übertragbar, d. h. es ist zu erwarten, dass sie ebenfalls die genannten Vorteile hinsichtlich Geräuschemissionen aufweisen.

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

Entsprechend den im vorangegangenen Abschnitt dargestellten Ausführungen zum Reduktionspotential bezüglich Lärm und Schadstoffen im rein elektrischen Betrieb lohnt es sich für die Dieselhybridbusse den realen Anteil an rein elektrischem Fahren im Linieneinsatz in Bezug auf den erzielbaren zeitlichen und streckenbezogenen Anteil zu ermitteln. Vorab ist aber zunächst darauf hinzuweisen, dass im Hinblick auf die Energie- und damit die Kraftstoffeffizienz, der rein elektrische Betrieb nur dann erstrebenswert ist, wenn die verwendete Energie nicht erst über den Verbrennungsmotor erzeugt wurde und damit entsprechenden Wandlungsverlusten unterlag, sondern durch Rekuperation beim Bremsen ohne Kraftstoffeinsatz zurückgewonnen wurde. Insofern ist die jeweilige Betriebsstrategie eines Hybridbusherstellers üblicherweise nicht auf Maximierung des Null-Emissionsbetriebes ausgelegt, sondern auf eine Maximierung der Energieeffizienz und damit der Kraftstoffersparnis. Mit der Festlegung des Antriebskonzeptes, Parallel- oder Seriell-Hybrid, erfolgt bereits eine grundsätzliche Festlegung hinsichtlich der Möglichkeit bzw. Eignung zum rein elektrischen Fahren. Während beim seriellen Hybrid im Wesentlichen die Größe des Energiespeichers die elektrische Reichweite bestimmt, ist beim Parallel-Hybrid der rein elektrische Betrieb, wenn überhaupt vorgesehen, auf bestimmte Fahrzustände wie zum Beispiel Anfahrvorgänge beschränkt. Damit fällt der Anteil des rein elektrischen Fahrens bei Bussen mit Parallel-Hybrid im Vergleich zu seriellen Hybridbussen prinzipbedingt niedriger aus.

Als erstes Beispiel wurde in Stuttgart für fünf serielle Gelenkhybridbusse der Anteil rein elektrischen Fahrens über einen Zeitraum von 11 Monaten (Januar bis November 2013) ausgewertet. Der verbaute Energiespeicher ist eine Lithiumeisenphosphatbatterie mit einem Energieinhalt von 27 kWh und verfügt damit von allen eingesetzten Hybridbussen über den größten Energiespeicher. Die im Mittel zurückgewonnene Bremsenergie beträgt für den topografisch anspruchsvollen Einsatz in Stuttgart 80 kWh/100km und entspricht 36% der eingesetzten Antriebsenergie. Der Anteil an rein elektrisch zurückgelegter Strecke beträgt dabei 30%. Dabei ist in 54% der gesamten Betriebszeit der Dieselmotor aus bzw. bei Betrachtung der reinen Fahrzeit immer noch in 40% der Fahrzeit (siehe Abbildung 19).

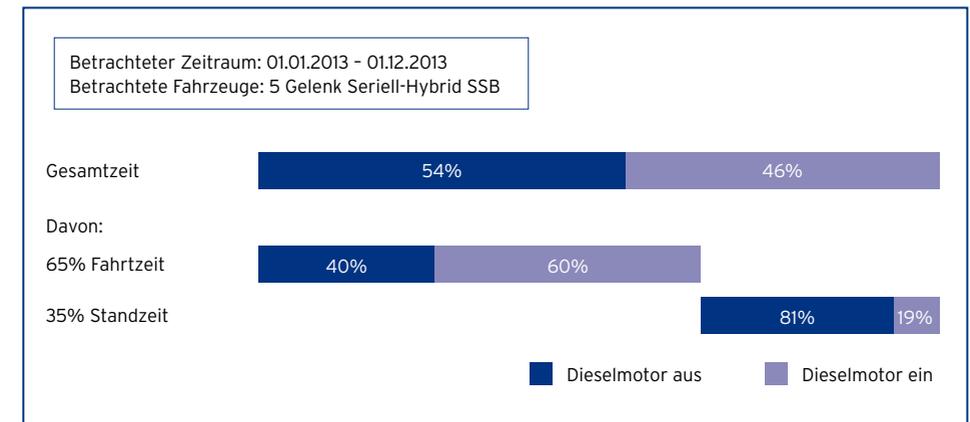


Abbildung 19: Anteil rein elektrisches Fahren in Stuttgart – Gelenk Seriell-Hybrid

Speziell im Stillstand kann der Betrieb des Dieselmotors in 81% der Zeit vermieden werden, d. h. gerade beim Halt an Haltestellen oder vor Lichtsignalanlagen ist der Dieselmotor mehrheitlich aus und sofern nicht unter Volllast angefahren wird, auch bei den anschließenden Anfahrvorgängen. Damit leisten die Hybridbusse gerade in diesen Betriebszuständen einen wesentlichen Beitrag zur Lärm- und Schadstoffreduktion.

Weiterhin liegen Daten für 7 Solobusse mit Parallel-Hybridantrieb der Verkehrsbetriebe Hamburg-Holstein AG für einen Zeitraum von 8 Monaten vor. Die Busse haben einen par-

allelen Hybridantrieb mit einer Lithiumionenbatterie (LiFePo_4), die über einen Energieinhalt von 4,8 kWh verfügt. Die rein elektrisch zurückgelegte Strecke liegt bei 1%. Hier wirkt sich einerseits die antriebskonzeptbedingte Begrenzung des rein elektrischen Fahrens bis Geschwindigkeiten von max. 20 km/h sowie andererseits die tendenziell enge Fahrplangestaltung aus, bei der die Abfahrvorgänge mehrheitlich unter Volllast geschehen. Der zeitliche Anteil (siehe Abbildung 20) bei dem der Dieselmotor aus ist, liegt für die gesamte Betriebszeit bei 17%. Der 30% Anteil Dieselmotor aus im Stand ist eine konservative Abschätzung und leitet sich aus den Untersuchungen des TÜV NORD ab (siehe nächster Abschnitt). Wie bereits erwähnt, weist ein Parallel-Hybridantrieb, bei dem prinzipbedingt ein Teil der Antriebsenergie mechanisch direkt vom Dieselmotor erzeugt wird, gegenüber einem seriellen Hybridantrieb, bei dem die Antriebsenergie ausschließlich elektrisch übertragen wird, einen höheren strecken- und zeitbezogenen Anteil auf, während dem der Dieselmotor an ist. Insofern zeigen die Ergebnisse sogar einen tendenziell höheren Anteil rein elektrischen Betriebs für den Parallel-Hybrid auf als zu erwarten war.

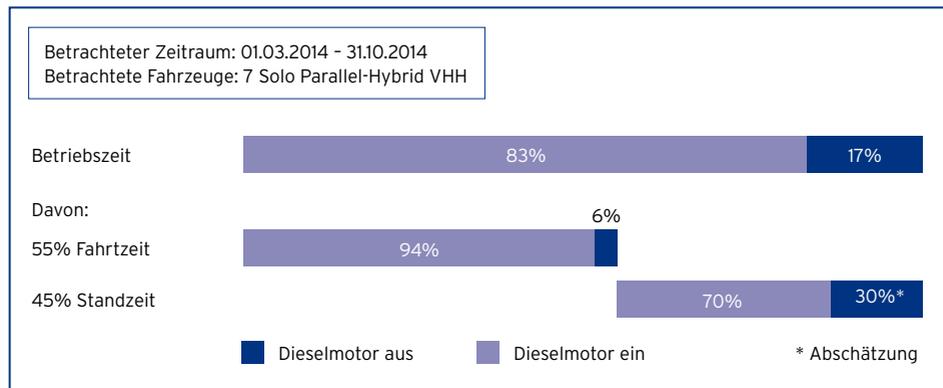


Abbildung 20: Anteil rein elektrisches Fahren bei VHH in Hamburg –Solo Parallel-Hybrid

Bei den von TÜV NORD durchgeführten Messuntersuchungen im Rhein-Ruhrgebiet wurde ebenfalls der zeitliche Anteil an rein elektrischem Betrieb für 3 Hybridbusse ausgewertet. Für den seriellen Gelenkhybridbus liegt der Anteil über die vermessenen Strecken bei 61%, für den seriellen Solohybridbus ergeben sich 43% und für den parallelen Solohybrid schließlich 15%.

Während der im Linieneinsatz erzielbare Anteil an rein elektrischen Betrieb zu allererst vom eingesetzten Hybridantriebskonzept und der verwendeten Energiespeichergröße abhängt, zeigen die Ergebnisse zusammen mit den bei der SSB und für die VHH durchgeführten Untersuchungen in der Gesamtschau die Bandbreite an erreichbarem Anteil rein elektrischen Betriebes mit Hybridbussen und veranschaulichen nochmals die Möglichkeiten zur Lärm- und Schadstoffminderung mit diesen innovativen Antriebstechnologien.

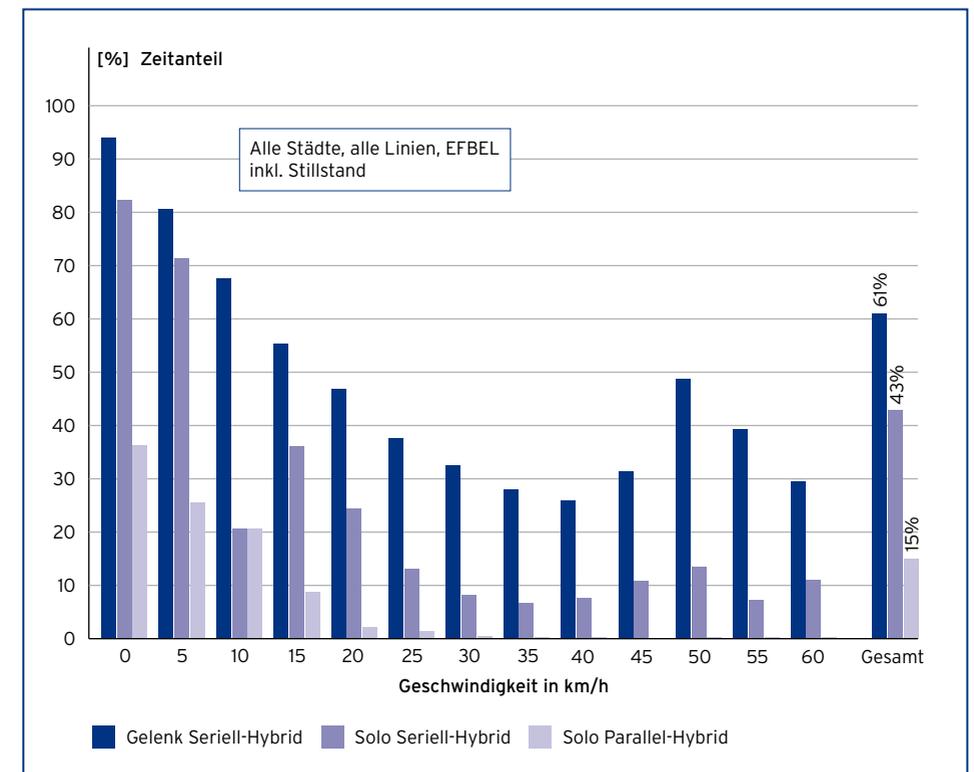


Abbildung 21: Zeitanteil rein elektrisches Fahren Hybridbusse EFBEL Projekt

Ökologie und Klimaschutz

- Klimaschutz und Ressourcenschonung: Die betrachteten Dieselhybridbusse haben seit Anfang 2013 mehr als 1.000 t CO₂ Äquivalente bzw. 364.000 l Dieselkraftstoff vermieden.
- Schadstoff- und Lärmemissionen: Die Hybridbusse weisen ein erhebliches Reduktionspotential bei Schadstoffen (bis zu -92% NO_x, damit bereits auf Euro VI Niveau) auf. 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 80% 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 Fahrgästen, gerade an Haltestellen. Die Batteriebusse fahren prinzipiell lokal emissionsfrei.
- Geräuschmessungen: Bei den Dieselhybridbussen ergibt sich durch das rein elektrische Anfahren eine Reduktion der Lautheit um über 65% gegenüber konventionellem Dieselbussen.
- Die Batteriebusse weisen ein analoges Lärminderungspotential auf.

>>2.4 WIRTSCHAFTLICHKEIT

Die mit den Innovativen Antriebstechnologien verbunden 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 ja gerade erst im Aufbau ist. So befinden sich die Busse teilweise immer noch in der Optimierung und es liegen aktuell maximal 4 Jahre Betriebserfahrungen mit den Hybridbussen vor. Von daher sind zum jetzigen Zeitpunkt auch noch keine Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen für die rein elektrischen Busse zielführend, die noch stärker am Anfang ihrer technologischen Entwicklungskurve stehen.

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. Abbildung 22 zeigt beispielhaft die typische Zusammensetzung der fahrzeugbezogenen Kosten eines konventionellen Dieselbusses:

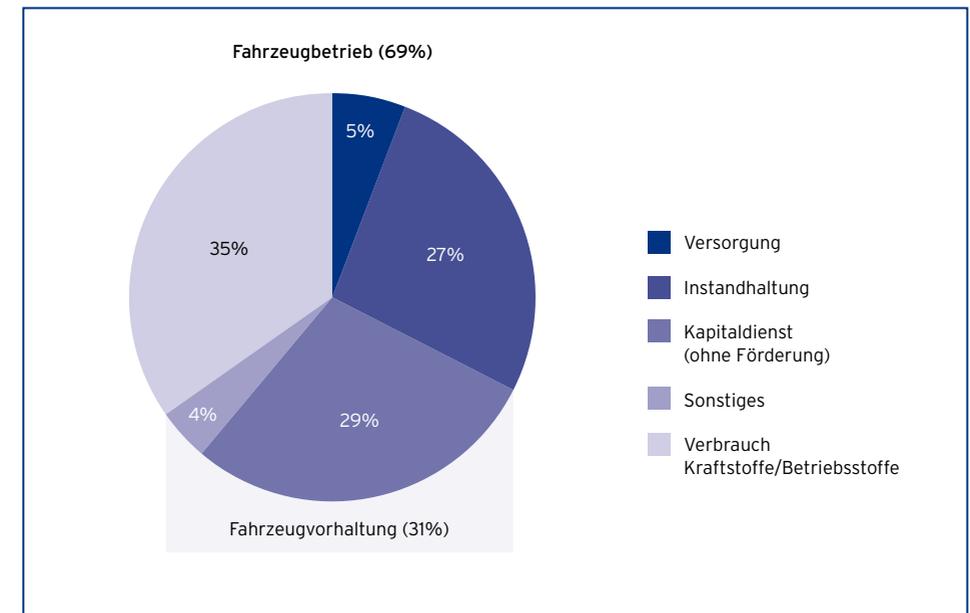


Abbildung 22: Typische Zusammensetzung der fahrzeugbezogene Kosten eines konventionellen Dieselbusses

Hierzu wurde das Kostenmodell aus dem vorangegangenen BMUB-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 eine typische Nutzungsdauer von 12 Jahren mit 720.000 km Laufleistung ergeben sich derzeit ohne Förderung 12-19% bzw. 15-28 ct/km höhere Gesamtlebenszykluskosten für die Hybridbusse (siehe Abbildung 23).

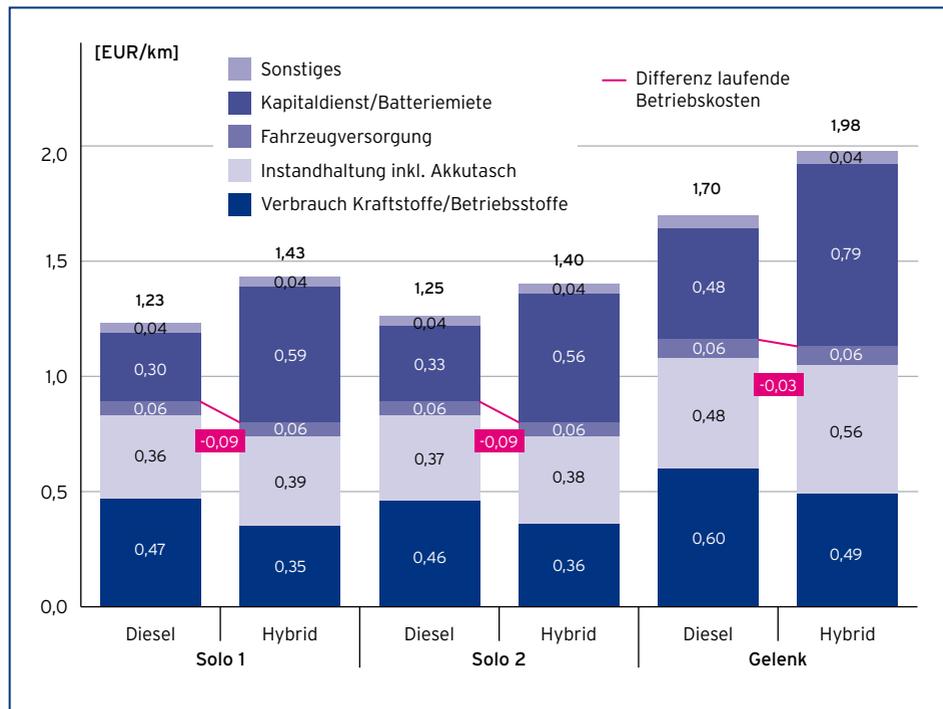


Abbildung 23: Gesamtkosten Hybrid und Dieselreferenzbusse im Vergleich

Im Einzelnen betragen die Mehrkosten der Hybridfahrzeuge bei Solobussen 15-20 ct/km und bei Gelenkbussen ca. 28 ct/km.

Gegenüber den Ergebnissen aus dem ersten Begleitprogramm kann hier eine leichte Verbesserung der Kostensituation (mit damals 22-26% bzw. 29-36 ct/km höheren Kosten bei SORT 2-Zyklus) beobachtet werden, wobei sich dieser Trend im weiteren Projektverlauf noch bestätigen muss. Die Reduktion der Mehrkosten um etwa 5-10 ct/km gegenüber 2011 ist überwiegend zurückzuführen auf:

- z. T. geringere Anschaffungsmehrkosten,
- höhere Kraftstoffeinsparung und
- höhere Kraftstoffkosten (ca. +10%, Stand Anfang 2014) und damit höhere wirtschaftliche Relevanz.

Im Rahmen der Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen wurde zudem abgeschätzt, wie sich wesentliche wirtschaftliche Rahmenbedingungen für den Hybridbus (Anschaffungsmehrkosten, Kraftstoffeinsparung, Dieselpreis und Batteriemiete) zukünftig entwickeln könnten. Dadurch wird aufgezeigt, welche Kostensituation im Vergleich zum Dieselparallelsolobus sich aus heutiger Sicht in den nächsten Jahren ergeben könnte und wann mit Kostenäquivalenz (ohne Förderung) zu rechnen ist.

Für das konkrete Beispiel eines Solo Parallel-Hybrid wurden folgende Entwicklungen abgeschätzt:

- Anschaffungsmehrkosten ohne Miete Energiespeicher: -10% p.a. auf ca. 40 k€ bis 2020
- Miete Energiespeicher: -5% p.a. auf ca. 3,5 k€ p.a. bis 2020
- Kraftstoffeinsparung: z. Zt. 20%, bis 2020 auf 25% steigend
- Dieselpreis: +5% p.a., entspricht Ø Jahre 1995-2013
- Mehraufwand Instandhaltung: 10% der hybridspezifischen Mehrkosten

Die daraus resultierende Kostensituation im Vergleich zum Dieselparallelsolobus ist in Abbildung 24 ersichtlich; demnach ist es möglich, dass eine Kostenäquivalenz (ohne finanzielle Förderung) für Busse, die zum Ende des Jahrzehnts ab 2018 bzw. 2019 beschafft werden, erreicht werden kann. Der angenommene Nutzungszeitraum beträgt 12 Jahre.

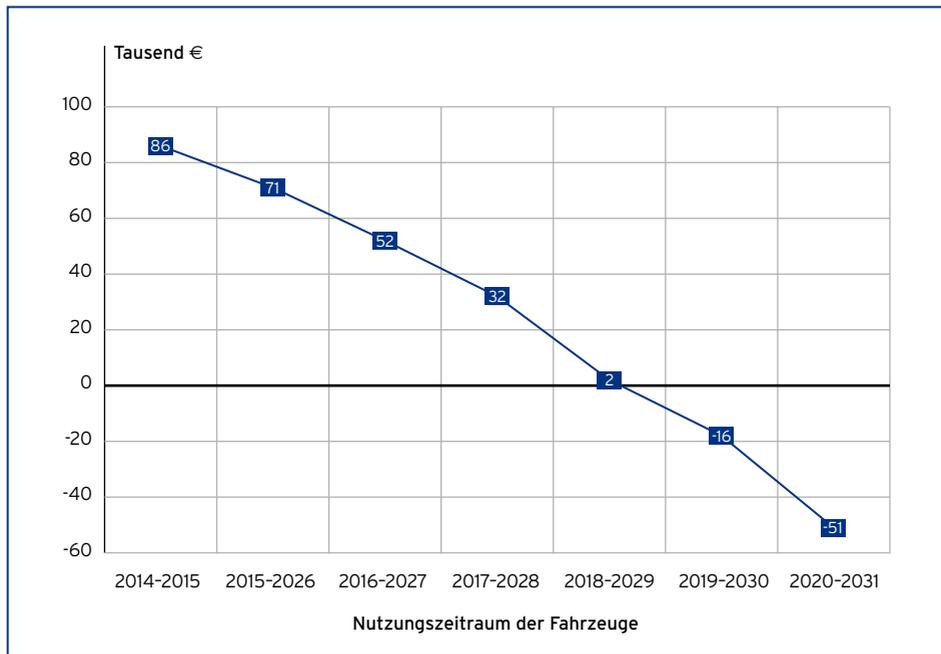


Abbildung 24: Mögliche Entwicklung Kostensituation ohne Förderung (Solobus Parallel-Hybrid, 12x 60 Tkm p.a.)

Mittels einer Sensitivitätsanalyse wurde dargestellt, dass für die Kostensituation von Hybridbussen vorrangig die erzielbare Kraftstoffeinsparung in Verbindung mit der Entwicklung des Dieselpreises und in Verbindung mit der jährlichen Laufleistung entscheidend ist.

Wie die Preisentwicklung für Dieselpkraftstoffe mit aktuell (Ende 2014) deutlichen Preiserückgängen zeigt, ist die konkrete Entwicklung dieses Faktors kaum zu prognostizieren, dennoch ist auch zukünftig über längere Zeiträume von insgesamt steigenden Preisen für fossile Kraftstoffe auszugehen.

Wirtschaftlichkeit

- Mehrkosten Dieselhybrid: Es bestehen weiterhin 12-19% Mehrkosten für Hybridbusse (für Solobusse 15-20 ct/km und Gelenkbusse bei 28 ct/km). Allerdings ist eine Reduktion der Mehrkosten gegenüber den Ergebnissen aus der früheren Begleitforschung um etwa 5-10 ct/km zu beobachten.
- Szenario zur Erreichung Kostenäquivalenz mit konventionellen Diesel (ohne finanzielle Förderung): Auf Basis der Abschätzung der Entwicklung wesentlicher Kostenparameter (Reduktion Anschaffungsmehrkosten und evtl. Batteriemieten um jährlich 10 bzw. 5 %, Steigerung Kraftstoffeinsparung auf 25% und hybridspezifische Mehraufwand Instandhaltung <10%) ist die Erreichung der Kostenäquivalenz mit dem konventionellen Dieselbusse über den Gesamtlebenszyklus von 12 Jahren in 5 Jahren möglich.



>> 3. ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Mit der gemeinsamen von BMVI und BMUB initiierten Arbeitsgruppe (AG) „Innovative Antriebe für den straßengebundenen ÖPNV“ wurde eine Plattform für den Informations- und Erfahrungsaustausch zum Einsatz innovativer Antriebstechnologien zwischen Verkehrsunternehmen, Vertretern der Wirtschaft, Forschungsinstitutionen und den Bundesministerien als Fördermittelgeber geschaffen. Auf effektive Weise vernetzt diese AG in Deutschland laufende Projekte zu elektrischen Antrieben im busbasierten ÖPNV.

Anhand eines bereits im Rahmen früherer Begleitforschungsaktivitäten der beteiligten Bundesministerien abgestimmten Vorgehens zur Evaluation erfolgt neben einer Dokumentation des realisierten technischen Standes der Fahrzeuge eine Bewertung der Praxistauglichkeit und der erreichbaren Umweltvorteile der betrachteten (teil)elektrischen Antriebstechnologien für Nahverkehrsbusse. Diese Bewertung dient zum einen der Unterstützung der Industrie bei der Entwicklung innovativer Antriebskonzepte, zum anderen wird dadurch ein Markimpuls zur Stärkung der Nachfrage für den Einsatz von Hybrid- bzw. rein elektrischen Bussen im ÖPNV gegeben.

Gegenüber den Begleitforschungsaktivitäten aus 2010-2012 konnte die Datenbasis für die Evaluation signifikant erweitert werden. Mit Betriebsdaten für gegenwärtig knapp 8 Mio. km von über 120 Dieselhybridbussen und 2,5 Mio. km von rund 40 konventionellen Dieselnbussen, die als Referenzfahrzeuge dienen, wird bereits ein breites Spektrum an Einsatzkontexten abgedeckt. Aktuell werden Betriebsdaten für 4 Batterie-Midibusse gesammelt, womit ein erster Grundstein für die noch aufzubauende Datenbasis für Batteriebusse gelegt wird. Der Aufbau der Datenbasis kann im Jahr 2015 mit den mehr als 20 Batteriebusen, die in verschiedenen Projekten zur Erprobung im Linieneinsatz vorgesehen sind, weiter vorangetrieben werden.

Praxistauglichkeit und Einsatzreife

Die Verfügbarkeit der Dieselhybridbusse beträgt abhängig von der betrachteten Antriebstechnologie bis zu 91%. Sie ist im Fall des Solo Parallel-Hybrids vergleichbar mit der Verfügbarkeit von konventionellen Dieselnbussen, die bei über 90% liegt. Die übrigen Hybridantriebskonzepte weisen weiteres Optimierungspotential auf. Erwähnenswert ist in diesem Zusammenhang, dass bei Betrachtung aller Dieselhybridbusse die Ausfallgründe bei Hybridbussen mehrheitlich im konventionellen Fahrzeugteil und nicht im Hybridantrieb liegen. Batteriebusse zeigen zumindest für zwei der vier betrachteten Fahrzeuge mit knapp 80% akzeptable Verfügbarkeitswerte. Bei den anderen Fahrzeugen führen teilweise Einmaleffekte, z. B. aufwendige Batterieconditionierung, zu einer nochmals reduzierten Verfüg-

barkeit. Es wird sich im weiteren Verlauf der Begleitforschung zeigen, wie sich die Verfügbarkeit mit steigender Entwicklungskurve und mehr Fahrzeugen im Einsatz zukünftig entwickelt.

Energieeffizienz

Die erzielte Kraftstoffeinsparung bei den Bussen mit innovativen Antrieben hängt von unterschiedlichen Faktoren ab. Einer davon ist die Eignung eines Antriebskonzepts für die jeweilige Linie im Hinblick auf Beschleunigungs- und Steigungsanteile. Ein weiterer Faktor ist die Heizung bzw. Kühlung des Fahrgastraums im jahreszeitlichen Verlauf bei entsprechenden Außentemperaturen.

In der AG Bus wurde der Kraftstoffverbrauch der Hybridbusse auf mehr als 20 Linien mit einem breiten Spektrum an Einsatzbedingungen (15-33 km/h mittlere Reisegeschwindigkeit, 3-18 überwundene Höhenmeter pro km) untersucht. Auf allen betrachteten Linien wurden gegenüber den konventionellen Euro V/EEV Dieselnbussen Einsparungen erzielt, die im Mittel bei ca. 14% liegen. Die Bandbreite zwischen den betrachteten Linien reicht von 1 bis 29% Kraftstoffeinsparung. Betrachtet man die unterschiedlichen Antriebstechnologien, so liegen die Einsparungen in einem Bereich von 7-25%. Damit können die Hybridbusse durchgängig einen Beitrag zur Ressourcenschonung leisten. Dies war in den Vorgängeruntersuchungen nicht bei allen Linien bzw. Einsätzen der Fall. Hier zeigt sich ebenso wie bei der Verfügbarkeit ein steigender technologischer Reifegrad der Fahrzeuge. So wurde beispielsweise für dasselbe Busmodell aus einem Mehrverbrauch von 12% auf einer untersuchten Linie im Zeitraum 2010-2011 in der aktuellen Begleitforschungsphase (2013-2014) ein Minderverbrauch von 9%.

Für Elektrobusse ist zum derzeitigen Stand noch keine vergleichende Aussage zum Energieverbrauch möglich. Die Batterie-Midibusse werden bisher in sehr speziellen Linieneinstellungen eingesetzt, zu denen noch keine direkt vergleichbaren Verbrauchsdaten von Dieselnbussen vorliegen. Dies wird aber im weiteren Verlauf der AG untersucht. Dabei wird auch das Thema Fahrgastraumklimatisierung eine Rolle spielen. Erste Untersuchungen verdeutlichen nochmals, dass z. B. die Beheizung des Busses bei niedrigen Außentemperaturen energetisch sehr relevant ist. Bei einem Batteriebus, der prinzipbedingt nicht über die Abwärme eines Verbrennungsmotors verfügt, kann der Energiebedarf der Heizung in der Praxis leicht den Fahrenergiebedarf erreichen bzw. übersteigen. Bei Hybridbussen ist ebenfalls eine Korrelation des Kraftstoffverbrauchs in Abhängigkeit mit der mittleren Außentemperatur zu erkennen, aber in einem deutlich kleineren Umfang (z. B. 5-10% Mehrverbrauch im Winter).

Ökologie und Klimaschutz

Die vermiedenen CO₂- bzw. Treibhausgasemissionen ergeben sich aus der eingesparten Kraftstoffmenge. Dementsprechend wurden seit Anfang 2013 mehr als 1.000 Tonnen CO₂-Äquivalente bzw. 364.000 Liter Dieseldieselkraftstoff eingespart.

Neben dem aktiven Beitrag zum Klimaschutz weisen Busse mit innovativen Antrieben weitere Vorteile, vor allem in Bezug auf die Reduktion von Schadstoff- und Lärmemissionen, auf. Während Elektrobusse grundsätzlich lokal schadstofffrei fahren, können Dieselhybridbusse in Abhängigkeit von der Auslegung des Antriebsstranges zumindest zeitweise im Null-Emissions-Modus betrieben werden. So kann der Motor im Stillstand, d. h. an Haltestellen und an Ampeln, in bis zu 80% der Einsatzzeit ausgeschaltet bleiben. Entsprechend kann die Abfahrt an Haltestellen mehrheitlich rein elektrisch und damit geräuscharm und emissionsfrei erfolgen. Gerade für Fahrgäste und Anwohner ergeben sich hier spürbare Entlastungen.

Messuntersuchungen zu Lärmemissionen veranschaulichen das Potential rein elektrischer Antriebe bei Nahverkehrsbussen. Sie ergaben für die Hybridbusse bei rein elektrischer Haltestellenabfahrt eine Reduktion der Lärmlautheit um 2/3. Die erreichten Reduktionen im Hinblick auf Luftschadstoffe bei den Hybridbussen fallen ebenfalls erheblich aus. Für NO_x-Emissionen ergibt sich eine Reduktion modellabhängig von bis zu 92% gegenüber vergleichbaren konventionellen Dieseldieselbussen. Die EEV-konformen Hybridbusse liegen damit bereits auf Euro VI Niveau.

Wirtschaftlichkeit

Die mit innovativen Antriebstechnologien verbundenen Kosten sind ein wesentlicher Faktor für deren erfolgreiche Markteinführung. Dabei ist eine Kostenbetrachtung über den gesamten Lebenszyklus wichtig.

Die aktuellen Untersuchungen bestätigen die Tatsache, dass innovative Antriebe mit Mehrkosten verbunden sind. Bei Zugrundelegung einer typischen Nutzungsdauer von 12 Jahren mit 720 Tkm Laufleistung und keiner finanziellen Förderung liegen sie für Dieselhybridbusse bei 12-19% bzw. 15-28 ct/km, für Solobusse bei 15-20 ct/km und für Gelenkbusse bei etwa 28 ct/km. Gegenüber den Ergebnissen aus der ersten Phase der Begleitforschung kann hier eine leichte Verbesserung der Kostensituation um etwa 5-10 ct/km beobachtet werden. Gründe hierfür liegen in zum Teil geringeren Anschaffungsmehrkosten, der erzielten höheren Kraftstoffeinsparung und den seither gestiegenen Kraftstoffkosten. Betrachtet man ein Szenario für die möglichen Entwicklungen einzelner Kostenpara-

meter, so lässt sich in einer ersten Abschätzung für das untersuchte Dieselhybridbusmodell ein möglicher Zielkorridor für die Erreichung der Kostenäquivalenz mit dem konventionellen Dieselbus innerhalb eines Zeithorizonts von ca. 5 Jahren beschreiben. Hierzu wurden Kostenentwicklungen für die wesentlichen Parameter abgeschätzt. Ein wirtschaftlicher Betrieb von Hybridbussen ist im Vergleich zu konventionellen Dieseldieselbussen möglich, wenn sich einerseits die Anschaffungsmehrkosten und evtl. zu leistende Batteriemieten um jährlich 10 bzw. 5 % reduzieren, und andererseits der Dieseldieselpreis um ca. 5% p.a. steigt. Weiterhin wurde unterstellt, dass bis 2020 die Kraftstoffeinsparung nochmals leicht auf 25% gesteigert werden kann und der hybridspezifische Mehraufwand in der Instandhaltung 10% nicht übersteigt.

Ausblick

Die AG Bus wird in 2015 fortgeführt und dient weiterhin als eine für weitere Teilnehmer offene Plattform zum Informations- und Erfahrungsaustausch. Die Begleitforschung wird entsprechend dem gemeinsam entwickelten Vorgehen und der Ausrichtung auf die zentralen Themenbereiche mit den definierten Bewertungsindikatoren fortgeführt.

Einer der inhaltlichen Schwerpunkte wird der weitere Ausbau der Datenbasis aus der Langzeitdatenerfassung sein, gerade im Hinblick auf die batterieelektrischen Busse. Ziel ist es, weitergehende Erkenntnisse in Bezug auf Praxistauglichkeit und Produktivität zu erlangen. Die Analyse des Umweltprofils vor dem Hintergrund unterschiedlicher Stromerzeugungsquellen stellt ebenfalls eine wichtige Fragestellung dar.

Im Bereich der Hybridbusse besteht durch die Fortführung des Monitorings die Möglichkeit, weiteren Aufschluss zu erhalten, wie sich die Technologien über die Zeit bewähren. In Bezug auf die Verfügbarkeit werden voraussichtlich Themen wie Defektbehebung und Ersatzteilverfügbarkeit mit zunehmender Einsatzdauer an Bedeutung gewinnen. Für die weitere Bewertung des Kraftstoffverbrauchs ist zum einen die Analyse des Nutzens von umgesetzten Optimierungsmaßnahmen geplant zum anderen soll untersucht werden inwiefern kritische Einflussgrößen auf den Kraftstoffverbrauch noch genauer bestimmt werden können. Damit könnten die geeigneten Einsatzbedingungen für die verfügbaren Antriebstechnologien genauer bestimmt und so weitere Potentiale zur Vermeidung von Treibhausgasen und zur Ressourcenschonung identifiziert werden. Darüber hinaus wird die Analyse der Wirtschaftlichkeit der Hybridbusse fortgeführt, um mögliche Maßnahmen im Hinblick auf ihren Beitrag zur Senkung der Mehrkosten zu bewerten.

Im Rahmen der detaillierten messtechnischen Untersuchungen werden weitere Busse mit innovativen Antriebstechnologien betrachtet. Geplant ist, neben einem Euro VI Parallel-Hybrid noch einen Brennstoffzellen- und einen Batteriebus im Hinblick auf Energieverbrauch sowie Schadstoff- (nur Dieselhybrid) und Lärmemissionen zu vermessen.

Die beteiligten Bunderessorts planen eine Fortsetzung des bisherigen Engagements für innovative Antriebstechnologien. Inhaltliche Schwerpunkte sind zum einen die Förderung der Technologieentwicklung und Erprobung von rein elektrischen Bussen, zum anderen die Förderung der Beschaffung von Dieselhybrid- und Plug-In Hybridbussen, um so weitere Impulse für einen Markthochlauf für Nahverkehrsbusse mit innovativen Antrieben zu setzen.



Bildnachweise:

Titel (von links nach rechts):

Hamburger Hochbahn, Stadtwerke Osnabrück, Stadtbus Ingolstadt, Münchner Verkehrsgesellschaft, Hamburger Hochbahn, Voith, Stuttgarter Straßenbahnen, üstra Hannoversche Verkehrsbetriebe, Braunschweiger Verkehrs-AG

S 5. Hamburger Hochbahn, VCDB VerkehrsConsult Dresden–Berlin

S. 12 Stuttgarter Straßenbahnen, Verkehrsverbund Rhein-Ruhr

S. 14 Hamburger Hochbahn, BOGESTRA, Stadtwerke Osnabrück

S. 19 REGIOBUS Mittelsachsen, Hagener Straßenbahn

S. 25 Dresdner Verkehrsbetriebe, Hochschule Wismar

S. 45 Verkehrsbetriebe Hamburg-Holstein, Hagener Straßenbahn

S. 50 Braunschweiger Verkehrs-AG, Hamburger Hochbahn

ANSPRECHPARTNER

Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI)

Referat G21 Elektromobilität

Invalidenstraße 44

10115 Berlin

Email: Ref-g21@bmvi.bund.de

Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB)

Referat IG I 5

Stresemannstraße 128-130

10117 Berlin

Email: IG15@bmub.bund.de

Koordination der AG Bus

NOW GmbH - Nationale Organisation Wasserstoff-
und Brennstoffzellentechnologie

Oliver Braune

Fasanenstraße 5

10623 Berlin

Email: oliver.braune@now-gmbh.de

hySOLUTIONS GmbH

Innovative Antriebe für Hamburg

Heinrich Klingenberg

Steinstraße 25

20095 Hamburg

Email: Heinrich.Klingenberg@hysolutions-hamburg.de

Koordination der wissenschaftlichen Begleitung AG BUS

PE INTERNATIONAL AG

Dr. Michael Faltenbacher

Hauptstraße 111-113

70771 Leinfelden - Echterdingen

Email: m.faltenbacher@pe-international.com

IMPRESSUM

Herausgeber

**Bundesministerium für Verkehr
und digitale Infrastruktur (BMVI)**

Invalidenstraße 44

10115 Berlin

Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB)

Referat IG I 5

Stresemannstraße 128-130

10117 Berlin

Koordination / Erstellung

NOW GmbH - Nationale Organisation Wasserstoff-
und Brennstoffzellentechnologie

Fasanenstraße 5

10623 Berlin

Autoren

Dr. Michael Faltenbacher

Dr. Olga Vetter, PE INTERNATIONAL

mit Beiträgen von:

Kai Scholz-Starke Ika, RWTH Aachen

Jan Hammer, TÜV NORD

Michael Unger

Martin Ruhl, BbA

Realisation / Gestaltung

www.agenturfuerstrahlkraft.de

Druck

Ruksaldruck, Berlin

Erscheinungsjahr

2015

