



Abschlussbericht



Begleitendes Prüfprogramm im Rahmen der „Effizienz- und Kostenanalyse für den Linienbetrieb von Hybridbussen“

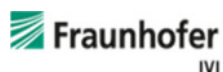
Im Auftrag des



**Bundesministerium
für Umwelt, Naturschutz
und Reaktorsicherheit**



BbA – Dr. Bruns & Fetzer
Unternehmensberatung GmbH



Abschlussbericht: Begleitendes Prüfprogramm im Rahmen des Fördervorhabens „Hybridbusse für einen umweltfreundlichen ÖPNV“

Auftraggeber: Bundesministerium für Umwelt, Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU)

Projektträger: VDI/VDE-IT GmbH

Mai 2012

Bearbeiter:

TÜV NORD Mobilität GmbH & Co. KG

Dipl.-Ing. Gaston Bourbon
Dipl.-Ing. Leif-Erik Schulte

PE INTERNATIONAL AG

Dipl.-Vw. Annekristin Rock
Dr.-Ing. Michael Faltenbacher

Dr. Bruns & Fetzer Unternehmensberatung GmbH

Dipl.-Wirtsch.-Ing. Martin Ruhl
Dipl.-Ing. Michael Unger
Dipl.-Kfm. Dr. Thomas Bruns

VCDB VerkehrsConsult Dresden-Berlin GmbH

Dipl.-Geogr. Christian Soffel
Dipl.-Ing. Jürgen Lange

**Fraunhofer Institut für Verkehrs-
und Infrastruktursysteme**

Dr.-Ing. Thoralf Knotte
Dipl.-Ing. Beate Haufe

**Institut für Kraftfahrzeuge
RWTH Aachen University**

Dipl.-Ing. Sven Ruschmeyer

Emitec Produktion GmbH

Dipl.-Ing. Sylvie Kröger

**TU Graz
Institut für Verbrennungskraftmaschinen
und Thermodynamik**

a.o. Univ.-Prof. Dr.
Stefan Hausberger

Inhaltsverzeichnis

ABBILDUNGSVERZEICHNIS	4
TABELLENVERZEICHNIS	6
GLOSSAR.....	7
1 EINLEITUNG	8
2 ARBEITSPAKETSTRUKTUR	10
3 FAHRZEUGE UND TEILNEHMENDE VERKEHRSBETRIEBE	11
4 MESSTECHNISCHE UNTERSUCHUNGEN	15
4.1 ERMITTLUNG DER CO ₂ -EMISSIONEN DER HYBRIDBUSSE UND DER HERKÖMMLICHEN REFERENZBUSSE	15
4.1.1 Fahrzyklen.....	15
4.1.2 Prüflabor und Messtechnik	20
4.1.3 Ausrollversuche / Coast-Down Messungen.....	22
4.1.4 Beurteilung des Ladezustandes des Energiespeichers	25
4.1.5 Rekuperation im Realbetrieb / Rekuperation auf dem Prüfstand.....	27
4.1.6 Ergebnisse der Verbrauchsmessungen.....	29
4.2 ÜBERPRÜFUNG DER FUNKTION DER ABGASNACHBEHANDLUNG	30
4.2.1 Ergebnisse der Abgasmessungen	31
4.3 ÜBERPRÜFUNG DER GERÄUSCHEMISSIONEN.....	35
4.3.1 Außengeräusche.....	35
4.3.2 Akustik Fahrgastraum.....	44
4.4 WISSENSCHAFTLICHER BEIRAT BEI DEN CO ₂ - UND ABGASMESSUNGEN	47
5 BETRIEBSWIRTSCHAFTLICHE UNTERSUCHUNGEN.....	49
5.1 BEWERTUNG DER INBETRIEBNAHME UND DES LINIENBETRIEBS	50
5.1.1 Zielsetzung und Vorgehensweise	50
5.1.2 Ergebnisse der Evaluierung der technischen Eigenschaften	53
5.1.3 Ergebnisse zum Ersatzteilmanagement.....	71
5.1.4 Erfahrungen bei der Inbetriebnahme und aus dem Linienbetrieb.....	73
5.2 ERMITTLUNG DER KOSTEN IM LINIENBETRIEB.....	83
5.2.1 Zielsetzung und Vorgehensweise	83
5.2.2 Strukturierung der Kosten und Datengrundlagen	83
5.2.3 Kostenanalyse und Ergebnisse	95
5.3 LÖSUNGSVORSCHLÄGE UND OPTIMIERUNG	112
5.3.1 Zielsetzung und Vorgehensweise	112
5.3.2 Optimierte Strategie zur Integration und Betrieb von Hybridbussen im Linieneinsatz.....	113
5.3.3 Kosten des Linienbetriebs pro Kilometer	115
5.3.4 Ersatzteile und Garantiefälle	118
5.4 FAZIT ZUR BETRIEBSWIRTSCHAFTLICHEN BETRACHTUNG	118

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Projektstruktur	10
Abbildung 2: Braunschweig-Zyklus	15
Abbildung 3: Vergleich Braunschweig-Zyklus zu FTP-75	17
Abbildung 4: Beschleunigungen / Verzögerungen Braunschweig-Zyklus	17
Abbildung 5: Regressionsanalyse Braunschweig-Zyklus Diesel-Referenz.....	19
Abbildung 6: Soll- / Istgeschwindg. Braunschweig-Zyklus Diesel-Referenz.....	19
Abbildung 7: Regressionsanalyse Braunschweig-Zyklus Hybridbus	20
Abbildung 8: Gelenkbus auf dem Rollenprüfstand.....	21
Abbildung 9: Abgasmassenstromsensor inkl. Probennahme	22
Abbildung 10: Streckenverlauf auf dem ATP-Ovalrundkurs	23
Abbildung 11: Ausrollkurve Hybrid, Richtung Süden	24
Abbildung 9: Ausrollkurve Hybrid, Richtung Norden	25
Abbildung 13: Antriebs- und Bremskräfte am 18m Bus bei Straßenfahrt	28
Abbildung 14: Antriebs- und Bremskräfte am 18m Bus Rollenprüfstand.....	28
Abbildung 15: Ablaufplan Messung der limitierten Abgaskomponenten	30
Abbildung 16: Abgastemperatur Braunschweig-Zyklus (Diesel-Referenz).....	32
Abbildung 17: Vergleich Abgastemperatur Braunschweig-Zyklus Hybridbus 1	33
Abbildung 18: Vergleich Abgastemperatur SORT-Zyklen.....	33
Abbildung 19: ISO-Geräuschmessstrecke der ATP in Papenburg	36
Abbildung 20: Messanordnung zur Erfassung der Außengeräusche	37
Abbildung 21: Anordnung der Messpunkte für die Messung des Rundumgeräusches	37
Abbildung 22: Rundumgeräuschvermessung	38
Abbildung 23: Schalldruck bei der beschleunigten Vorbeifahrt.....	39
Abbildung 24: Vergleich der Maximalschalldruckpegel (Messmethode A und B).....	40
Abbildung 25: Vergleich der max. Schallpegel bei einem Hybridbus.....	41
Abbildung 26: Verteilung der Rundumgeräusche bei einem Hybridbus	42
Abbildung 27: Pegelverlauf einer Haltestellen An- und Abfahrt (Diesel-Referenz).....	43
Abbildung 28: Pegelverlauf einer Haltestellen An- und Abfahrt (Hybridbus)	43
Abbildung 29: Mess-Setup Fahrgastraumgeräuschmessungen an einem Hybridbus.....	45
Abbildung 30: Frequenz-Spektrogramm bei Haltestellenabfahrt (Hybridbus)	46
Abbildung 31: Überblick Ansatz und Ablauf AP 2	51
Abbildung 2: Bewertungskriterien und Themenfelder	52
Abbildung 33: Aufbau und Funktionsweise der SoFi Software	53
Abbildung 34: SoFi - Anwendung zur Datenerfassung	54
Abbildung 35: Beispiel Bericht Betriebsdaten in SoFi.....	55
Abbildung 36: Auswertungsschema für das Arbeitspaket 2 (Auszug)	58
Abbildung 37: Laufleistung Hybridbusse (in km).....	60
Abbildung 38: Betriebsdauer der Hybridbusflotte (Angaben in h).....	62
Abbildung 39: Statistische Auswertung von Laufleistung und Betriebsstunden	63

Inhaltsverzeichnis

Abbildung 40: Verfügbarkeit der Hybridbusse nach Betrieb	64
Abbildung 41: Vergleich durchschnittliche Verfügbarkeit Hybrid- vs. Dieselreferenzbusse.....	65
Abbildung 42: Kraftstoffeinsparung Hybrid- vs. Referenzfahrzeug	68
Abbildung 43: Kraftstoffverbrauch Hybrid vs. Referenzbus (Sortierung nach Geschwindigkeit)	69
Abbildung 44: Kraftstoffverbrauch Hybrid vs. Referenzbus (Sortierung nach Höhenmetern)	69
Abbildung 45: Treibhausgaseinsparung Hybridbusse vs. Referenzfahrzeuge im Projekt	71
Abbildung 46: Ablaufschema Wartungsprozess beim Hybridbus	72
Abbildung 47: Zugehörigkeit der teilnehmenden Fahrer zu Städten und Regionen (links) und Anteil von Frauen und Männern unter den Befragten (rechts)	76
Abbildung 48: Gesamtbeurteilung der Hybridbusse (Anzahl der Nennungen)	79
Abbildung 49: Assoziationen mit dem Begriff „Hybridbus“	81
Abbildung 50: Assoziationen der Passanten mit dem Begriff „Hybridbus“	82
Abbildung 51: Fahrzeugbezogene Kosten	84
Abbildung 52: Kostenaufteilung Dieselbusbetrieb (virtuelle Solo-Dieselbusflotte aller Teilnehmer im überwiegenden Stadtverkehr)	84
Abbildung 53: Entwicklung der Instandhaltungskosten über den Lebenszyklus (virtuelle Solo-Dieselbusflotte aller Teilnehmer im überwiegenden Stadtverkehr)	86
Abbildung 54: Vorgehen zur Kostenabschätzung Instandhaltung (schematisch).....	87
Abbildung 55: Dreistufiges Verfahren der Datenerfassung.....	91
Abbildung 56: Erfassung von Basis-, Ausstattungs- und Betriebsdaten der Bestandsbusse.....	91
Abbildung 57: Erfassung allgemeiner Kostendaten der Referenzbusse	93
Abbildung 58: Personaleinsatz in Abhängigkeit vom Fahrzeugalter („virtuelle" Flotte)	96
Abbildung 59: Materialeinsatz in Abhängigkeit vom Fahrzeugalter („virtuelle" Flotte).....	97
Abbildung 60: Kosten für Instandhaltung und Versorgung moderner Diesel-Referenzbusse	100
Abbildung 61: Fahrzeugbezogene Gesamtkosten moderner Diesel-Referenzbusse.....	101
Abbildung 62: Ansatz kumulierte Instandhaltungsquote	102
Abbildung 63: Kostenunterschiede für Kapitaleinsatz und Kraftstoffverbrauch zwischen Hybridbussen und modernen Diesel-Referenzbussen (Nutzungsdauer 12 Jahre)	104
Abbildung 64: Fahrzeugbezogene Kosten im Vergleich (SORT und Braunschweig-Zyklus)	104
Abbildung 65: Fahrzeugbezogene Kosten im Vergleich (SORT und Braunschweig-Zyklus)	105
Abbildung 66: Spezifische Kostenauswertung Hybrid-Solobus	111
Abbildung 67: Spezifische Kostenauswertung Hybrid-Gelenkbus	111
Abbildung 68: Break-even-Verlauf für die geförderten Hybridbusse mit einer Kraftstoffeinsparung von 20 Prozent gegenüber Diesel-Referenzbussen als Funktion des Dieselpreises und der Anschaffungsmehrkosten.....	116
Abbildung 69: Break-even-Verlauf für nicht geförderte Hybridbusse mit einer Kraftstoffeinsparung von 20% gegenüber Diesel-Referenzbussen als Funktion des Dieselpreises und der Anschaffungsmehrkosten.....	117

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Übersicht Hybridbusse	11
Tabelle 2: Übersicht der teilnehmenden Regionen	12
Tabelle 3: Kenndaten VÖV Befragung zur Entwicklung Braunschweig-Zyklus	16
Tabelle 5: Vergleich VÖV Befragung / Braunschweig-Zyklus	16
Tabelle 6: <i>Vergleich SORT-Zyklen</i>	18
Tabelle 6: Prozentuale Einsparungen Hybridbus gegenüber Dieselreferenz bei den Verbrauchsmessungen.....	30
Tabelle 7: Abgasergebnisse Diesel-Referenzbus	31
Tabelle 8: Abgasergebnisse Hybridbus 1	32
Tabelle 9: Abgasergebnisse Hybridbus 2	34
Tabelle 11: Aufgabenteilung der Arbeitspakete	49
Tabelle 11: Überblick Datenverfügbarkeit Lübeck und Hannover.....	56
Tabelle 13: Überblick Datenverfügbarkeit RegioHybrid	57
Tabelle 13: Laufleistung Hybridbusse über Projektlaufzeit	59
Tabelle 14: Gesamte Betriebsdauer der Hybridbusse über Projektlaufzeit	61
Tabelle 15: Ausstattungsstandard und Gewichtungsfaktoren für moderne Dieselbusse	98
Tabelle 16: nominelle durchschnittliche Reisegeschwindigkeit der SORT-Zyklen und des	98
Tabelle 17: Kostenansätze für Unfall/Vandalismus, Umbau/Modernisierung und Reifen	99
Tabelle 18: Kostenansätze für Fahrzeugversorgung und Versicherung.....	99
Tabelle 19: Instandhaltungsaufwand für die Komponenten der Abgasnachbehandlung (DPF)	100
Tabelle 20: Systembedingte Zusatzkosten des Hybridbuseinsatzes.....	110
Tabelle 22: Übersicht Hybridbusse inkl. Einsatzbetrieb	122

Glossar

EEV	Enhanced Environmentally Friendly Vehicle
NiMH	Nickel-Metallhydrid-Batterie
ÖPNV	Öffentlicher Personennahverkehr
Rwg.	Rechnungswagen
SORT	Standardised - On - Road Tests Cycles (Standardisierte Zyklen für Straßentests)
VB	Verkehrsbetriebe
VG	Verkehrsgesellschaft
DPF	Dieselpartikelfilter

1 Einleitung

Das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) fördert im Rahmen eines Markteinführungsprogramms die Beschaffung von Hybridbussen durch Verkehrsbetriebe des öffentlichen Personennahverkehrs (ÖPNV).

Dieses Projekt begleitet das Fördervorhaben wissenschaftlich. Im Projekt werden die durch das BMU geförderten Hybridbusse im Linienbetrieb untersucht und bewertet hinsichtlich ihrer Energieeffizienz und damit ihrer CO₂-Emissionen im Vergleich zu herkömmlichen Dieselbussen, ihrer Einsatzreife, ihrer Zuverlässigkeit und der Akzeptanz bei Fahrern und Fahrgästen sowie ihrer Kosten im Vergleich zu modernen Dieselbussen ohne Hybridtechnologie.

Die Hybridtechnologie kann bei Linienbussen, die häufig bremsen und anfahren, hohe Effizienzpotenziale erschließen, da ein wesentlicher Anteil der Bremsenergie bei dieser Technologie zurückgewonnen und für den Betrieb eines Elektromotors zur Verfügung gestellt werden kann (Rekuperation). Dieser treibt die Linienbusse vor allem beim Anfahren und im unteren Lastbereich an. Somit ist neben einer Kraftstoffeinsparung auch eine Verringerung der Abgas- und Geräuschemissionen möglich. Die Förderung wurde mit der Einhaltung anspruchsvoller Umweltstandards und Leistungsdaten verknüpft. So mussten die Hybridbusse folgende Mindeststandards erfüllen:

- a. Die CO₂-Emissionen werden um mindestens 20 Prozent gegenüber einem vergleichbaren Linienbus ohne Hybridtechnologie reduziert (gemessen im „Braunschweig“-Zyklus).
- b. Die Busse sind mit einem geschlossenen (wall-flow) Partikelfiltersystem ausgestattet. Die Partikelemissionen (PM) unterschreiten den EEV-Standard von 0,02 g/kWh, nachgewiesen im ESC- und ETC- Fahrzyklus nach 2005/55/EG.
- c. Es müssen Abgasnachbehandlungsmaßnahmen ergriffen werden, so dass die Stickoxidemissionen (NOX) den EEV-Standard von 2 g/kWh, nachgewiesen im ESC- und ETC- Fahrzyklus nach 2005/55/EG, unterschreiten.
- d. Die Lärmemissionen betragen maximal 75 dB(A) bei einer Motorleistung ≤150 kW bzw. 77 dB(A) bei einer Motorleistung > 150 kW. Daneben müssen die Fahrzeuge so ausgestattet sein, dass eine deutliche Reduzierung des Innenraumlärms erreicht wird.

Die oben genannten Punkte b. und c. beziehen sich auf Angaben der Fahrzeughersteller, die Punkte a. und d. wurden innerhalb der Begleitforschung des Vorhabens „Hybridbusse für einen umweltfreundlichen ÖPNV“ mittels umfangreicher Messkampagnen bearbeitet.

Die fahrzeugbezogenen Kosten im Linienbetrieb werden analytisch ermittelt und die Inbetriebnahme und der Linienbetrieb der Hybridbus-Kleinflotten sowohl qualitativ als auch quantitativ bewertet; nicht zuletzt werden entsprechende Lösungsvorschläge bzw. Optimierungspotenziale aufgezeigt.

Das Projekt ermöglicht so eine Quantifizierung der Ziele des Fördervorhabens und erarbeitet Empfehlungen, die sich aus den Erfahrungen im Verlauf des Projekts in den Regionen ableiten lassen.

Die Bearbeitung des technischen Teils des Projekts erfolgt in einer Kooperation verschiedener Unternehmen bzw. Institutionen unter Federführung der TÜV NORD Mobilität GmbH & Co. KG – Institut für Fahrzeugtechnik und Mobilität, Essen. Die weiteren Partner sind die Emitec Produktion GmbH, das Institut für Kraftfahrzeuge der RWTH Aachen, die VerkehrsConsult Dresden-Berlin (VCDB) sowie das Fraunhofer Institut für Verkehrs- und Infrastruktursysteme (IVI). Der betriebswirtschaftlich-technische Teil wurde ebenfalls in einer Kooperation verschiedener Unternehmen bzw. Institutionen bearbeitet, hierbei unter Federführung der PE INTERNATIONAL AG. Die weiteren Partner sind BbA Dr. Bruns & Fetzler Unternehmensberatung GmbH, VerkehrsConsult Dresden-Berlin (VCDB) sowie das Fraunhofer Institut für Verkehrs- und Infrastruktursysteme (IVI).

2 Arbeitspaketstruktur

Das Begleitprogramm ist in sechs Arbeitspakete (im folgenden AP genannt) aufgeteilt, die durch die verschiedenen Projektpartner teils gemeinsam, teils in Zusammenarbeit unter Federführung eines Projektpartners bearbeitet werden. Prinzipiell kann zwischen technisch / messtechnischem Teilprojekt und betriebswirtschaftlich / technischem Teilprojekt unterschieden werden. Die Abbildung 1 gibt einen Überblick über die Projektstruktur und die an den Arbeitspaketen (AP) jeweils beteiligten Kooperationspartner:

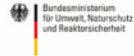









Auftraggeber	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit	
Projekträger	VDI/VDE Innovation + Technik GmbH, Berlin	
Auftragnehmer messtechnische Untersuchungen		
AP 1 Ermittlung der CO ₂ -Emissionen der Hybridbusse und der herkömmlichen Standardbusse (Referenzbusse)	TÜV [®] NORD Mobilität GmbH & Co. KG - Institut für Fahrzeugtechnik und Mobilität, Essen, Emitec Produktion GmbH, Prüfzentrum Eisenach, VCDB VerkehrsConsult Dresden-Berlin GmbH, Fraunhofer-Institut für Verkehrs- und Infrastruktursysteme IVI, Dresden	
AP 2 Überprüfung der Funktion der Abgasnachbehandlung	VCDB VerkehrsConsult Dresden-Berlin GmbH, Fraunhofer-Institut für Verkehrs- und Infrastruktursysteme IVI, Dresden	
AP 3 Überprüfung der Geräuschemissionen	TÜV [®] NORD Mobilität GmbH & Co. KG - Institut für Fahrzeugtechnik und Mobilität, Institut für Kraftfahrzeuge (ika), RWTH Aachen University	
Auftragnehmer betriebswirtschaftlich-technische Untersuchungen		
AP 1 Ermittlung der Kosten im Linienbetrieb pro Kilometer	BbA - Dr. Bruns & Fetzler Unternehmensberatung GmbH, Hamburg VCDB VerkehrsConsult Dresden-Berlin GmbH	
AP 2 Bewertung der Inbetriebnahme und des Linienbetriebes der Hybridbus-Kleinflotten	PE INTERNATIONAL AG, Leinfelden-Echterdingen VCDB VerkehrsConsult Dresden-Berlin GmbH, Fraunhofer-Institut für Verkehrs- und Infrastruktursysteme IVI	
AP 3 Lösungsvorschläge und Optimierung	BbA - Dr. Bruns & Fetzler Unternehmensberatung GmbH, PE INTERNATIONAL AG, VCDB VerkehrsConsult Dresden-Berlin GmbH, Fraunhofer-Institut für Verkehrs- und Infrastruktursysteme IVI	
Beirat Wissensch. Beratung bei CO ₂ - u. Abgasmessungen	Institut für Verbrennungskraftmaschinen und Thermodynamik, TU Graz	
Wissensch. Beratung bei Geräuschemessungen	Institut für Kraftfahrzeuge (ika), RWTH Aachen University	

Abbildung 1: *Projektstruktur*

Alle dem Projekt zugrunde liegenden Informationen und Daten stammen von verschiedenen involvierten Herstellern und den nord deutschen Betreibern der geförderten Hybridbusse.

3 Fahrzeuge und teilnehmende Verkehrsbetriebe

Im Vorhaben wurden drei Hybridbusvarianten unterschiedlicher Hersteller betrachtet. Hierbei handelte es sich um die Hersteller Hess, MAN und Solaris.


Die vom Bundesumweltministerium (BMU) geförderten Hybridbusse werden in verschiedenen Städten und Regionen eingesetzt. Die folgende Übersicht stellt die Hybridbusse und deren Einsatzgebiet vor:

Tabelle 1: Übersicht Hybridbusse

			
Hersteller	Hess	MAN	Solaris/Allison
Bustyp	Gelenkbus	Solobus	Gelenkbus
Hybridtechnologie	seriell	seriell	leistungs-verzweigt
Antriebsleistung Dieselmotor	220 kW	184 kW	181 kW
Antriebsleistung elektrischer Motor	2 x 100 kW	2 x 75 kW	2 x 75 kW
Energiespeichertyp	Super-Caps	Ultra-Caps	Nickel-Metallhydrid-Batterie
Energieinhalt	1,1 kWh	0,4 kWh	11,2 kWh
Anzahl Fahrzeuge	11	29	10
Einsatz in	Lübeck, Leipzig, Dresden	RegioHybrid Sachsen, Lübeck	Hannover

Während die Fahrzeuge in Lübeck und Hannover ausschließlich im Stadtverkehr eingesetzt werden, findet in Sachsen bei einzelnen Verkehrsbetrieben ein Einsatz im Stadt- sowie Überlandverkehr statt. Die Hybridbusse werden dabei sowohl in Städten eingesetzt, die bereits Erfahrungen mit Hybridantrieben haben (Hannover, Leipzig und Dresden) als auch in Städten, die mit der Beschaffung der Hybridbusse Neuland betreten. Insgesamt nehmen 12 Verkehrsbetriebe an dem Feldversuch teil. Zehn der teilnehmenden Verkehrsbetriebe sind unter dem Dach des Vorhabens „RegioHybrid Sachsen“ organisiert: DVB Dresden, LVB Leipzig, LeoBus Leipzig, Müller Busreisen, Satra Eberhardt, Regionalverkehr Dresden, Verkehrsbetriebe Freiberg, Verkehrsgesellschaft Döbeln, Verkehrsgesellschaft Meißen und Regiobus Mittelsachsen. Die beiden Verkehrsbetriebe Stadtverkehr Lübeck und üstra Hannover komplettieren das Teilnehmerfeld. Die einzelnen Projekte sowie die dort eingesetzten Hybridbusse werden im Folgenden tabellarisch vorgestellt:

Tabelle 2: Übersicht der teilnehmenden Regionen

<p>Hansestadt Lübeck</p>	
<p>Organisation</p>	<p>Stadtverkehr Lübeck</p>
<p>Busse</p>	<ul style="list-style-type: none"> • 5 Hess Swiss Hybrid Gelenkbusse mit seriellem Dieselhybridantrieb • 5 MAN Lion's City Hybrid Solobusse mit seriellem Dieselhybridantrieb <p><u>Inbetriebnahme</u></p> <p>Hess: Busse 1-3: Juli 2011 Busse 4-5: August 2011</p> <p>MAN: Busse 1-3: Ende Juli-August Busse 4-5: Oktober 2011</p>
<p>Inhalt</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Praxiserprobung und technische Betreuung der Dieselhybridbusse sowie Evaluierung zum Stand der Technik und Betriebstauglichkeit • Installation eines Hocharbeitsstandes für Arbeiten am Hybridantrieb • Schulung der Mitarbeiter im Fahrdienst und in der Technik • Akzeptanzbefragung von Fahrgästen, Passanten & Fahrern
<p>Partner</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Hess • MAN

<p>Hannover</p>	
<p>Organisation</p>	<p>üstra Hannover</p>
<p>Busse</p>	<p>10 Solaris Urbino Gelenk-Hybridbus mit leistungsverzweigtem Dieselhybridantrieb</p> <p><u>Inbetriebnahme:</u> September 2011</p>
<p>Inhalt</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Linieneinsatz der Busse auf einer auserwählten „Hybridbuslinie“, auf der neben dem Referenzfahrzeug während des Projektes ausschließlich die Hybridbusse fahren • Öffentlichkeitsarbeit zur Akzeptanzsteigerung • Verstärkung der bereits bestehenden Hybridbusflotte • Datenerfassung der Betriebs- und Havariedaten • Akzeptanzbefragung von Fahrgästen & Fahrern
<p>Partner</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Solaris • Allison

<p>RegioHybrid Sachsen</p>	
<p>Organisation</p>	<p>10 sächsische Verkehrsbetriebe: LVB Leipzig (Konsortialführer), DVB Dresden, LeoBus, Regionalverkehr Dresden, Verkehrsbetriebe Freiberg, Verkehrsgesellschaft Döbeln, Regiobus Mittelsachsen, Satra Eberhardt, Verkehrsgesellschaft Meißen, Müller Busreisen</p>
<p>Busse</p>	<ul style="list-style-type: none"> • 24 Solobusse MAN Lion's City bei 9 Verkehrsunternehmen • 6 Gelenkbusse von Hess/Vossloh-Kiepe bei 2 Verkehrsunternehmen <p><u>Inbetriebnahme</u> Juli - Dezember 2011</p>
<p>Inhalt</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Analyse der Einsatzlinien zur Vorbereitung des Hybridbuseinsatzes (Topographie, Durchschnittsgeschwindigkeit und Haltestellenabstände) • Erfassung der Betriebs- und Havariedaten in Zusammenarbeit mit dem Fraunhofer IVI • Optimierung der Eventsteuerung bei den Hess Hybridbussen • Akzeptanzbefragung von Fahrgästen & Fahrern
<p>Partner</p>	<ul style="list-style-type: none"> • HESS • MAN • VCDB • Fraunhofer IVI

4 Messtechnische Untersuchungen

4.1 Ermittlung der CO₂-Emissionen der Hybridbusse und der herkömmlichen Referenzbusse

Für den Nachweis eines mindestens 20-prozentigen Verbrauchsvorteils für den Hybridbus im Vergleich zu einem Dieselfahrzeug wurde der auf einem Rollenprüfstand zu (durch-) fahrende „Braunschweig-Zyklus“ herangezogen. Alternativ hätten die SORT 1 bzw. SORT 2 Zyklen Anwendung finden können. Für beide Bewertungszyklen („Braunschweig-Zyklus“ und SORT-Zyklen) galt, dass zur Bewertung des Einsparpotenzials jeweils so viele Messungen durchgeführt werden mussten, bis bei drei aufeinanderfolgenden Zyklen eine Abweichung von maximal 2 Prozent im CO₂ bzw. Kraftstoffverbrauch zu beobachten war. Eine weitergehende Fehlerbetrachtung im Hinblick auf diese zweiprozentige Bandbreite erfolgte nicht.

4.1.1 Fahrzyklen

4.1.1.1 Braunschweig-Zyklus

Der im Original „Stochastischer Fahrzyklus für Stadt-Linienomnibusse“ bzw. „Stadtbus-Zyklus“ genannte Braunschweig-Zyklus wurde in den Jahren 1974 / 1975 an der technischen Universität Braunschweig aus dem damaligen U.S.-amerikanischen Rollenprüfstandszyklus für PKW (FTP 75) abgeleitet /1/. Abbildung 2 zeigt das Geschwindigkeitsprofil des Braunschweig-Zyklus als Funktion der Zeit. Die Ableitung aus dem FTP-75 erfolgte durch Einführung diverser Haltestellen (16) und verkehrsbedingter Stopps (12), dem Ausblenden höherer Geschwindigkeitsanteile und dem Zufügen weiterer Fahranteile. Diese Art der stadtbusspezifischen Zyklusentwicklung wurde dadurch begründet, dass Linienbusse größtenteils im innerstädtischen Verkehr „mitschwimmen“ müssen und daher, dass aus realen Fahrten abgeleitet Fahrprofil des FTP-75 auch für Stadtbusse, bis auf die fehlenden Haltestellen und die höheren Geschwindigkeitsanteile, repräsentativ sei.

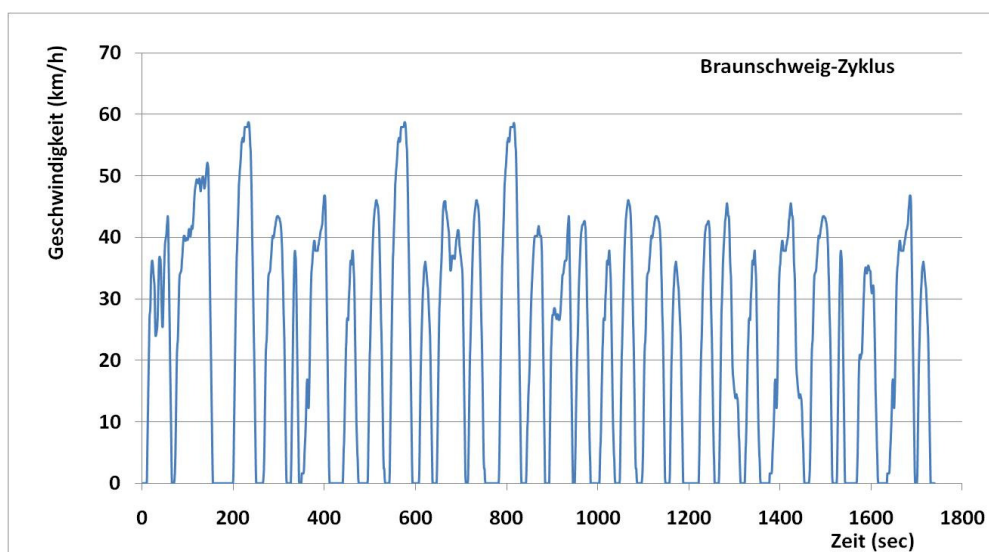


Abbildung 2: Braunschweig-Zyklus

Die Einbindung der Haltestellen und verkehrsbedingten Stopps sowie die daraus abgeleiteten Werte für die durchschnittliche Linienlänge, Liniendauer und Reisegeschwindigkeit wurde durch eine gemeinsame Befragung der TU Braunschweig und des VÖV-Verband öffentlicher Verkehrsbetriebe (heute VdV-Verband Deutscher Verkehrsunternehmen) ausgearbeitet. Diese Befragung erstreckte sich auf Verkehrsbetriebe in neun Städten der Bundesrepublik mit mehr als 500.000 Einwohnern /1/. Tabelle 3 zeigt die seinerzeit ermittelten Mittelwerte der Befragung.

Tabelle 4 den Vergleich zwischen den Befragungswerten und dem tatsächlich abgeleiteten Zyklus.

Tabelle 3: Kenndaten VÖV Befragung zur Entwicklung Braunschweig-Zyklus

KenngroÙe	arithm. Mittelwert
Linienlänge	10,9 km
Haltestellen inkl. Endhalt	17,6
mittl. Haltestellenabstand	617,4 m
Reisedauer	28 min
mittl. Geschwindigkeit	31,1 km/h
Reisegeschwindigkeit inkl. Stopps	23,4 km/h

Tabelle 4: Vergleich VÖV Befragung / Braunschweig-Zyklus

KenngroÙe	VÖV Umfrage	Stadtbuszyklus	Abweichung
Fahrtstrecke	10899 m	10865 m	- 0,31%
Fahrdauer	1262 sec (21 min)	1298 sec (21,6 min)	+ 2,9%
mittl. Haltestellenabstand	617,4 m	639,1 m	+ 3,5%
mittl. Fahrgeschwindigkeit	31,1 km/h	30,1 km/h	-3,2%
Reisegeschwindigkeit inkl. Stopps	23,4 km/h	22,5 km/h	-4,0%

Abbildung 3 zeigt einen Vergleich zwischen dem Braunschweig-Zyklus (TUB) und dem FTP-75. Die vielen identischen Verläufe, der wegen der eingeführten Haltestellen jedoch zeitlich versetzten Fahrprofile, sind in der Abbildung leicht erkennbar. Die im Braunschweig-Zyklus maximal auftretenden Beschleunigungen und Verzögerungen bewegen sich im Bereich um $1,5 \text{ m/s}^2$ (Abbildung 4) und sind somit in Größenordnungen angesiedelt, die einem eher moderaten Fahrzeugbetrieb entsprechen.

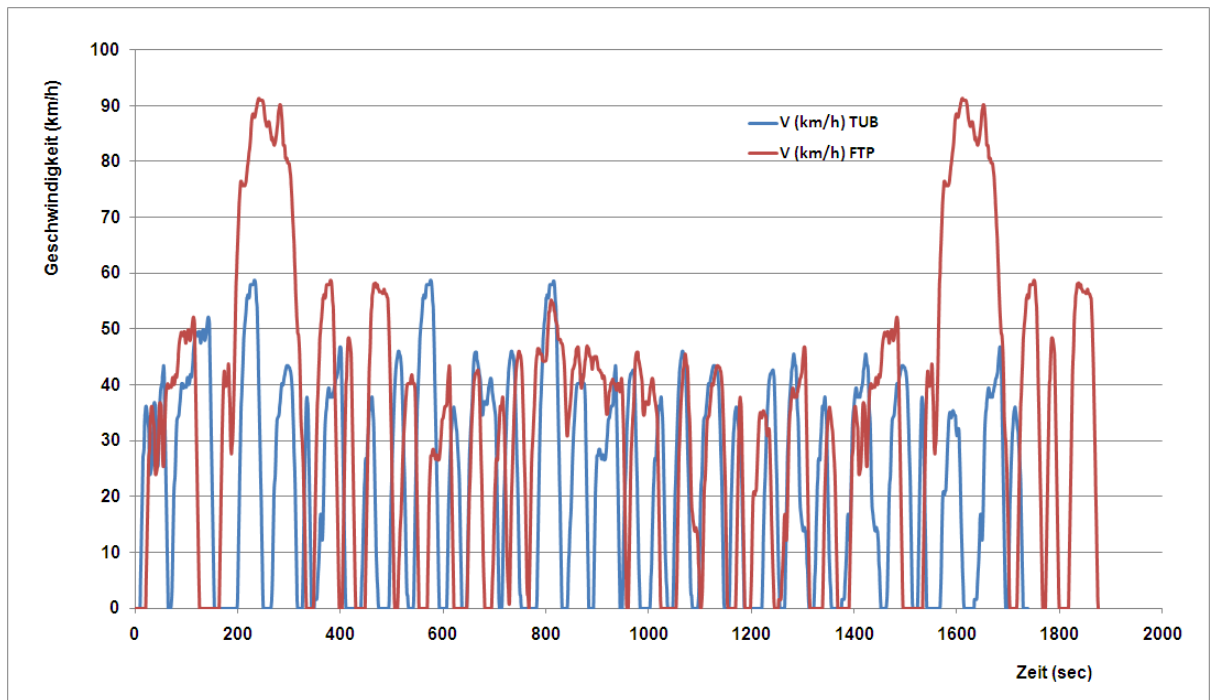


Abbildung 3: Vergleich Braunschweig-Zyklus zu FTP-75

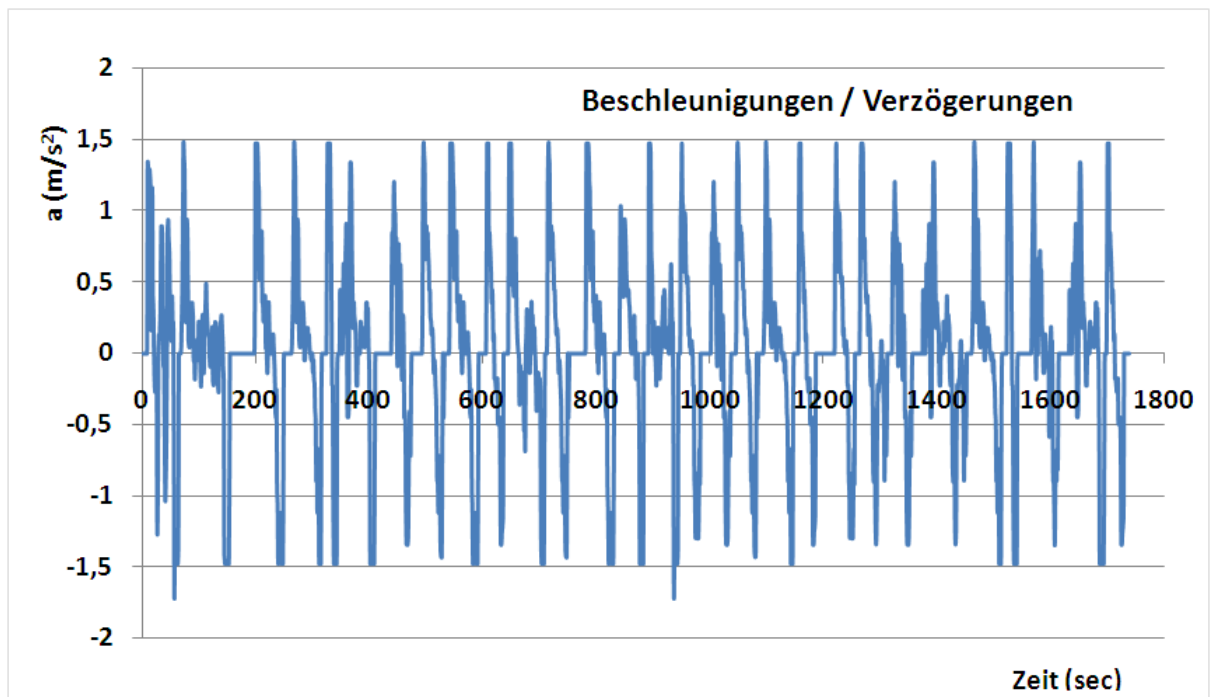


Abbildung 4: Beschleunigungen / Verzögerungen Braunschweig-Zyklus

4.1.1.2 SORT-Zyklen

Neben den Messungen im Braunschweig-Zyklus, wurden die Fahrzeuge auch in den SORT-Zyklen vermessen. SORT steht hier für *Standardised On Road Test*. Bei diesen

Zyklen handelt es sich um von der UITP (*International Association of Public Transport*) entwickelte Fahrzyklen, die z.B. auf abgesperrten Prüfgeländen direkt mit dem Bus nachgefahren werden können. Es wurden von der UITP weitestgehend repräsentative, praxisnahe und reproduzierbare Fahrzyklen für Linienbusse mit jeweils festgelegten Durchschnittsgeschwindigkeiten für drei Einsatzfälle definiert:

- „Schwerer Innenstadtbetrieb“ = SORT-Zyklus 1,
- „Leichter Innenstadtbetrieb“ = SORT-Zyklus 2 und
- „Vorortsbetrieb“ = SORT-Zyklus 3.

Diese Zyklen setzen sich aus unterschiedlichen Fahr- und Haltestellenanteilen zusammen und können wie folgt zusammengefasst werden (Tabelle 5).

Tabelle 5: Vergleich SORT-Zyklen

	Schwerer Stadtverkehr SORT 1	Leichter Stadtverkehr SORT 2	Vorortverkehr SORT3
Stoppzeiten in Prozent (Haltestelle)	40	35	20
Stopps pro Kilometer (Haltestellen)	6	3	2
Durchschnittsgeschwindigkeit (km/h)	12,6	18,6	26,3

4.1.1.3 Zyklusfahrbarkeit

Im Vorfeld zu den Messungen wurde diskutiert, ob der beschriebene Braunschweig-Zyklus auch für Hybridbusse anwendbar ist. Es wurde überlegt, dass die geforderten Beschleunigungen unter Umständen von einem hybriden Antriebsstrang nicht erreicht werden können. Die generelle Vorgehensweise war hierzu jedoch an die Vorgaben für Rollenprüfstandszyklen für PKW angelehnt. Hier wird beschrieben, dass ein Fahrzeug, sollte es der Zyklusvorgabe nicht folgen können, stets so zu betreiben ist, dass die jeweilige Vollast des Motors in einem solche Fall abzufordern ist. Das heißt, sollte eine vorgegebene Geschwindigkeit nicht erreicht werden können, muss das Fahrzeug am Vollastanschlag („Vollgas“) betrieben werden.

Zur Überprüfung der Zyklusfahrbarkeit wurden jeweils Regressionsanalysen zwischen dem Soll-Profil (Geschwindigkeitsvorgabe) des Braunschweig-Zyklus und dem gemessenen Ist-Geschwindigkeitsprofil durchgeführt. Solche Regressionsanalysen sind in den Regelwerken für Motorenprüfstandsmessungen an Nutzfahrzeugmotoren /9/ vorgeschrieben und wurden im Vorhaben analog für die Rollenprüfstandsmessungen herangezogen.

Abbildung 5 zeigt exemplarisch eine ebensolche Regressionsanalyse für einen Dieselreferenzbus für einen Braunschweig-Zyklus. Es ist zu erkennen, dass das Sollgeschwindigkeitsprofil vom Fahrzeug auf dem Rollenprüfstand sehr gut nachgefahren werden kann. Der Korrelationskoeffizient R^2 liegt bei 0,991 und zeugt somit von einer guten bis sehr guten Fahrbarkeit des Zyklus. Die einzig erkennbaren gröbereren Verfehlungen liegen im Geschwindigkeitsbereich zwischen 40 km/h und 55 km/h.

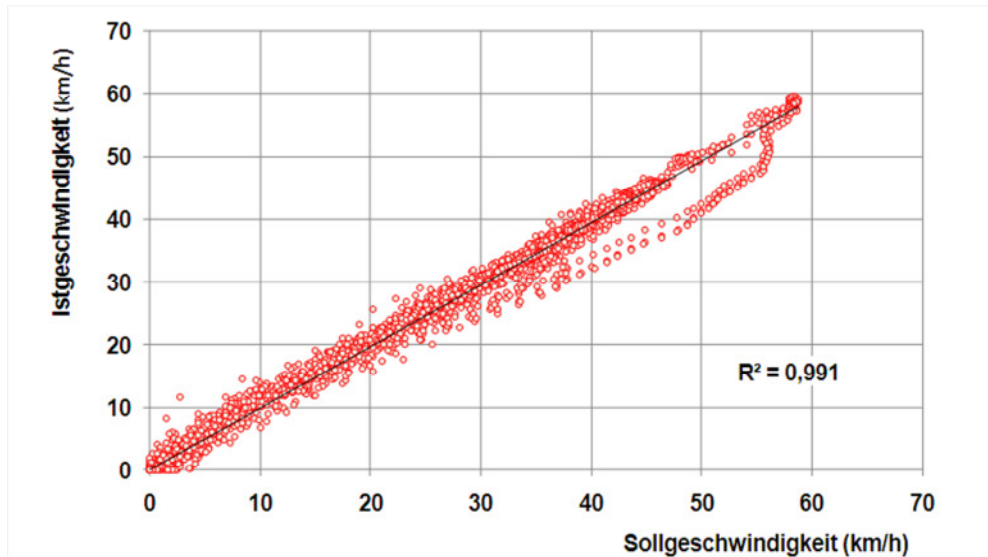


Abbildung 5: Regressionsanalyse Braunschweig-Zyklus Diesel-Referenz

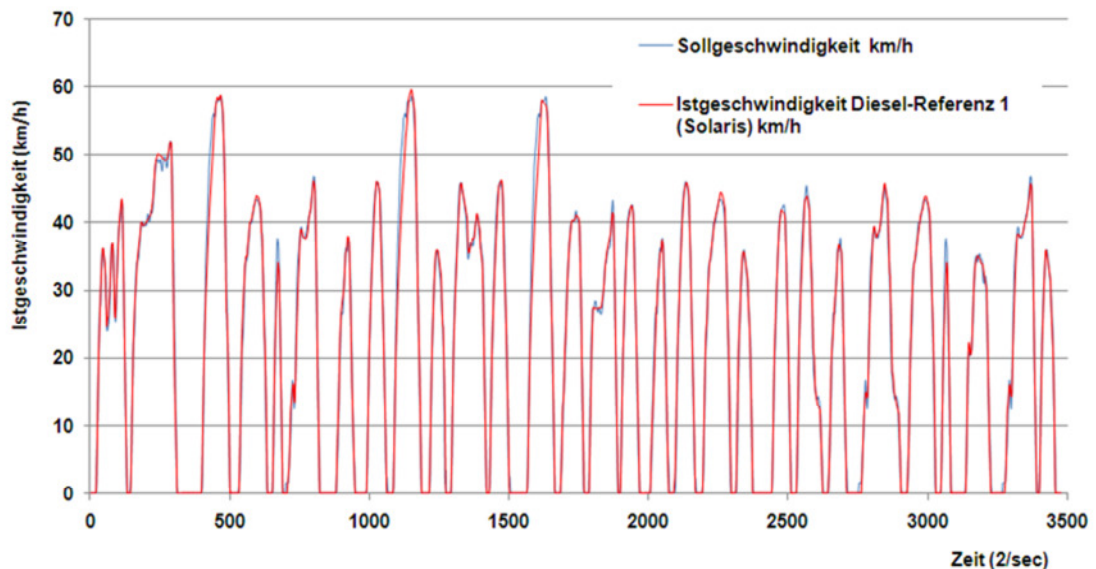


Abbildung 6: Soll- / Istgeschwindg. Braunschweig-Zyklus Diesel-Referenz

Der Grund für diese einigen wenigen Verfehlungen ist aus Abbildung 6 zu entnehmen. In einigen Bereichen des Sollprofils zwischen den 40 km/h und 60 km/h ist zu erkennen, dass die Ist-Geschwindigkeit jeweils nur mit geringem Zeitversatz zum Sollprofil erreicht werden kann. Dies führt dann zu den erkennbaren Abweichungen bei der Korrelationsbetrachtung. Die geforderten Endgeschwindigkeiten um ca. 60 km/h werden jeweils zeitnah erreicht und sind daher wieder punktgleich in der Korrelation.

Eine identische Zyklusbetrachtung ist in Abbildung 23 für einen Hybridbus dargestellt. Der Korrelationskoeffizient R^2 liegt bei 0,9898 und ist damit nur sehr geringfügig schlechter als für die Diesel-Referenz. Die Abweichung zwischen 40 km/h und 55 km/h sind auf dieselben Zusammenhänge wie bei der Diesel-Referenz zurückzuführen.

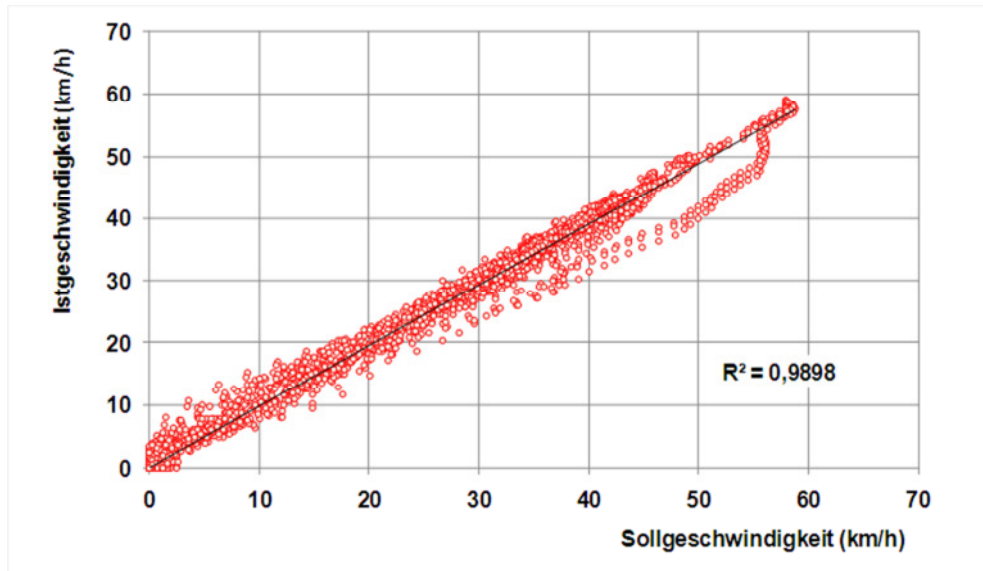


Abbildung 7: Regressionsanalyse Braunschweig-Zyklus Hybridbus

Auf Grund der guten bis sehr guten Korrelation zwischen dem Soll- und dem Istprofil des Braunschweig-Zyklus wird auf eine Betrachtung der SORT-Zyklen hinsichtlich ihrer Fahrbarkeit verzichtet.

Insgesamt kann gesagt werden, dass alle Busse die Zyklusvorgaben mit guter bis sehr guter Korrelation zu den Anforderungs-Fahrprofilen erreicht haben. Für Motorenprüfstands-messungen ist ein minimales R^2 von 0,97 für die Drehzahl, von 0,88 für das Drehmoment und von 0,91 für die Leistung gefordert /9/. Überträgt man diese Anforderungen auf das Geschwindigkeitsprofil der Rollenprüfstandszyklen, können so ebenfalls gute Übereinstimmungen resümiert werden.

4.1.2 Prüflabor und Messtechnik

Die zur Durchführung der gestellten Messaufgaben notwendige Mess- und Prüftechnik wurde vom Projektpartner Emitec Produktion GmbH, Prüfzentrum Eisenach zur Verfügung gestellt. Der dort vorhandene Rollenprüfstand (Abbildung 5) verfügt über die entsprechende Messtechnik für die diskutierten Messaufgaben. Der Rollensatz verfügt über folgende Spezifikation:

- Laufrollendurchmesser: 1828.8 mm (72“), Fahrbahnbreite: 3000 mm
- Maximale Achslast: 20.000 kg
- Maximale Testgeschwindigkeit: 160 km/h
- Massensimulationsbereich: 2.000 bis 30.000 kg
- Maximale permanente Leistung: 450 kW ab 64.8 km/h
- Maximale permanente Zugkraft: 25.000 N bis 64.8 km/h

- Fahrweg: 2.700 bis 8.000 mm
- Gleichzeitiger Betrieb von 2 Achsen bis zu einer Leistung von 600 kW.

Für die Abgasmessungen (gasförmige Komponenten) stand eine Abgasmessanlage der Firma Horiba, Typ Mexa 7100 für die Messung folgender Komponenten:

- Gesamt-Kohlenwasserstoffen THC,
- Stickoxiden NO_x inkl. Diskriminierung NO / NO_2 ,
- Methan CH_4 ,
- Kohlenmonoxid CO ,
- Kohlendioxid CO_2 (als Verbrauchsäquivalent) und
- Sauerstoff O_2

mit folgenden Analysatoren zur Verfügung:

- CO high: NDIR, Typ AIA-722 Messbereich: 0-0,5-12 Vol. %
- CO low: NDIR, Typ AIA-721A Messbereich: 0-50-2250 ppm
- O₂: Typ MPA-720 Messbereich: 0-1-25 Vol. %
- CO₂: NDIR, Typ AIA-722 Messbereich: 0-0,5-20 Vol. %
- NO / NO_x:
Doppel CLD, Typ CLA-757 Messbereich: 0-500-10000 ppm
- THC / CH₄:
Doppel FID, Typ FIA-726-N2
THC: Messbereich: 0-500-10000 ppmC1
CH₄: Messbereich: 0-2500 ppmC.



Abbildung 8: Gelenkbus auf dem Rollenprüfstand

Die Messung der gasförmigen Abgaskomponenten inklusive CO_2 erfolgte im unverdünnten, rohen Abgas. Hierzu wurde ein Abgasmassenstromsensor inkl. Probennahemstrecke und Temperaturmessung der Firma Sensors an das Endrohr des jeweiligen Fahrzeuges angebracht (Abbildung 9).

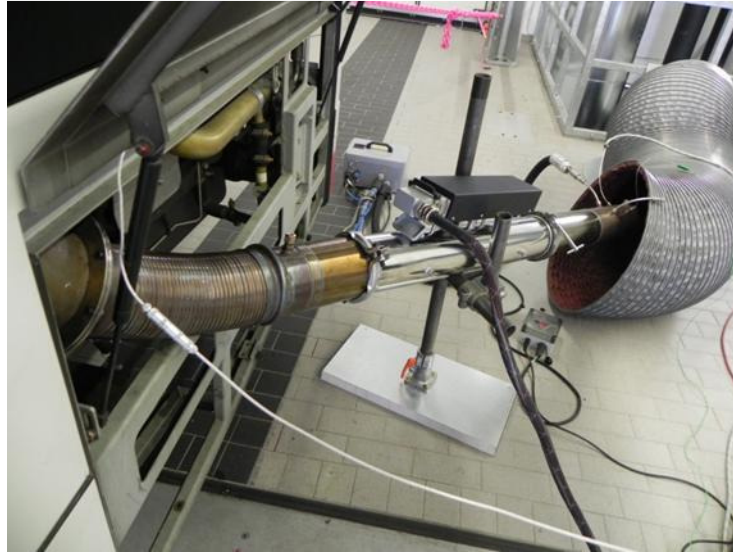


Abbildung 9: Abgasmassenstromsensor inkl. Probennahme

4.1.3 Ausrollversuche / Coast-Down Messungen

Für die Rollenprüfstandsmessungen war es notwendig, zuvor eine Fahrwiderstandsbestimmung an den Fahrzeugen durchzuführen. So können die dem Fahrzeug entsprechenden Fahrwiderstände auf dem Rollenprüfstand eingestellt werden.

Diese Fahrwiderstandsaufnahme erfolgte über Ausrollversuche (*coast-down*) auf einem Versuchsgelände. Dies war notwendig, um ein vom übrigen Straßenverkehr unbeeinflusstes Ausrollen der Fahrzeuge zu gewährleisten.

Hierzu wurde der Ovalkurs auf dem Testgelände ATP in Papenburg / Emsland angemietet. Die Strecke verläuft etwa von Norden nach Süden. Sie verfügt über vier nebeneinander liegende Fahrstreifen mit einer Länge von ca. 5 km je Richtung, von denen der erste (innere) Fahrstreifen unterschiedliche Belagsstrukturen aufweist. Der zweite Fahrstreifen besteht von Norden nach Süden über eine Asphalt- und von Süden nach Norden über eine Betonfahrbahn. Die Fahrbahnen sind eben und ohne Steigung. Die Bahnen drei und vier sind schneller fahrenden Fahrzeugen vorbehalten. Die hier beschriebenen Versuchsfahrten fanden ungestört von anderen Fahrzeugen statt.

Nachteilig für die Messdatenaufnahme sind lediglich zwei Brücken über den Fahrbahnen, die die Aufnahme per GPS-Signal kurzzeitig unterbrechen. Hinsichtlich des generellen Vorgehens beim Ausrollen von Nutzfahrzeugen verweisen wir auf unsere bereits durchgeführten Arbeiten /4/. Die folgende Abbildung 10 zeigt den Streckenverlauf auf dem ATP-Gelände.

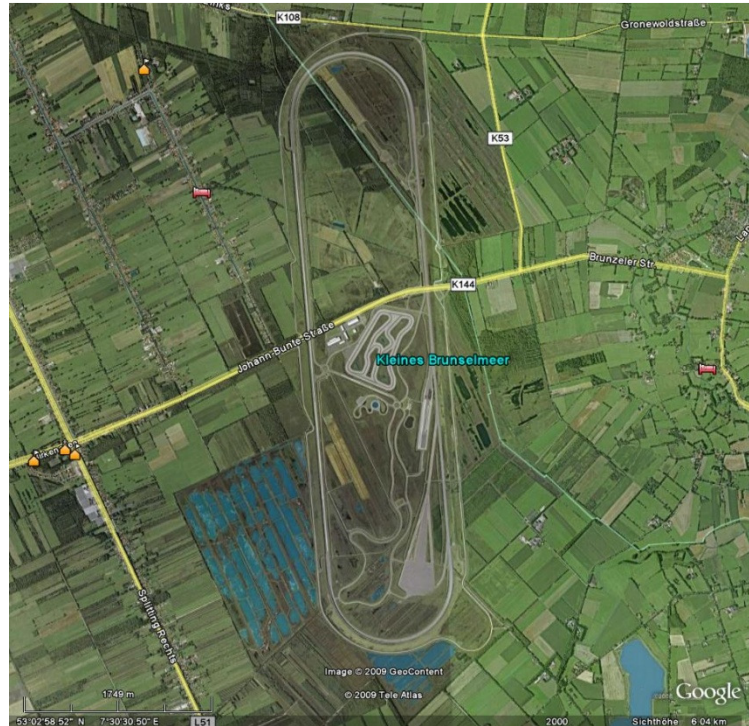


Abbildung 10: Streckenverlauf auf dem ATP-Ovalrundkurs

Die Ausrollversuche wurden in Anlehnung an die Vorgaben zur Fahrwiderstandsbestimmung aus den einschlägigen PKW-Richtlinien /5/ durchgeführt. Entsprechende Vorgaben für Nutzfahrzeuge sind derzeit noch nicht festgelegt, befinden sich jedoch in laufenden Forschungsvorhaben in der Entwicklung /6, 7/.

Trägt man die Ausrollzeit über der Geschwindigkeit auf, kann die Zeitänderung Δt je Geschwindigkeitsänderung Δv abgelesen werden. Aus der erhaltenen Schar von Ausrollkurven wird über die Mittelung der einzelnen Zeiten pro Geschwindigkeitsintervall eine mittlere Ausrollkurve bestimmt. Zwecks Glättung des Signalverlaufs (Eliminierung von Schwankungen, Messsignalrauschen, u.ä.) wird zu der mittleren Ausrollkurve ein Polynom dritten Grades bestimmt. Über dieses Polynom der Geschwindigkeit als Funktion der Ausrollzeit lässt sich dann die Geschwindigkeit zu jedem beliebigen Zeitpunkt auf der Ausrollkurve bestimmen.

Ausrollversuche an PKW zeigen erfahrungsgemäß eine deutlich bessere Wiederholbarkeit hinsichtlich der Abweichungen des Δt über der Geschwindigkeit. Die bei Nutzfahrzeugen üblicherweise erzeugten Daten zeigen meist Variationskoeffizienten im Bereich von 2 bis 10 Prozent. Dies ist dadurch zu begründen, dass bei kleiner werdenden Messwerten eine im Verhältnis dazu etwa konstant bleibende Abweichung, relativ betrachtet, eine immer größer werdende Abweichung darstellt. Ferner nimmt der Luftwiderstand bei geringen Geschwindigkeiten stark ab, so dass sich Umwelteinflüsse (z.B. Wind) stärker auswirken können.

Von jedem Fahrzeug wurden die Fahrzeugdaten unter Berücksichtigung der für die Fahrwiderstände relevanten Parameter aufgenommen. Vor jedem Fahrversuch wurden die Fahrzeuge einem Eingangskontrolle unterzogen. Dabei wurden die Reifen auf Auffälligkeiten am Profil und hinsichtlich des korrekten Luftdrucks überprüft. Die Fahrzeug-

masse wurde bei den entsprechenden Ladungszuständen jeweils durch Wägung festgehalten. Um vor den einzelnen Ausrollversuchen die Fahrzeuge zu stabilisieren, wurde eine mindestens 30minütige Vorkonditionierungsfahrt bei möglichst hohen Geschwindigkeiten durchgeführt. Bei Temperaturen des Hinterachsgetriebeöls um 80 °C wurde der Triebstrang als stabilisiert betrachtet. Parallel dazu wurde die Reifentemperatur an der Reifenflanke gemessen, deren Niveau allerdings auch von der Umgebungs- und der Fahrbahnoberflächentemperatur abhängt. Für die Aufnahme des Geschwindigkeitsabfalls über die Zeit wurden die Fahrzeuge auf ca. 80 km/h beschleunigt und in der neutralen Getriebestellung bis auf unter 10 km/h ausgerollt. Jede Ausrollung wurde 10-fach pro Richtung wiederholt.

Für die Ausrollversuche wurden die Fahrzeuge wie folgt beladen bzw. betrieben:

- Tankfüllung mindestens 50 Prozent
- Teilbeladung mit 50 Prozent der maximalen Zuladung, d.h. 3000kg für den Solo- / 4000kg für den Gelenkbus, sowie
- Betrieb ohne Klimaanlage, Heizung, (Fahrgastraum-) Lüftung, Beleuchtung und Kneeling.

In den Abbildungen 11 und 12 sind die Ausrollkurven für ein Hybrid-Fahrzeug exemplarisch dargestellt.

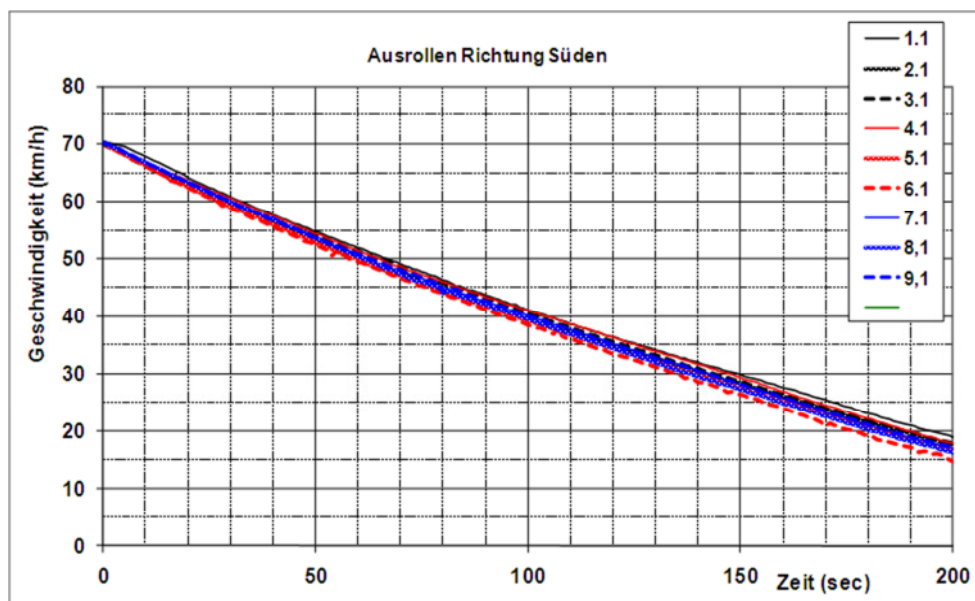


Abbildung 11: Ausrollkurve Hybrid, Richtung Süden

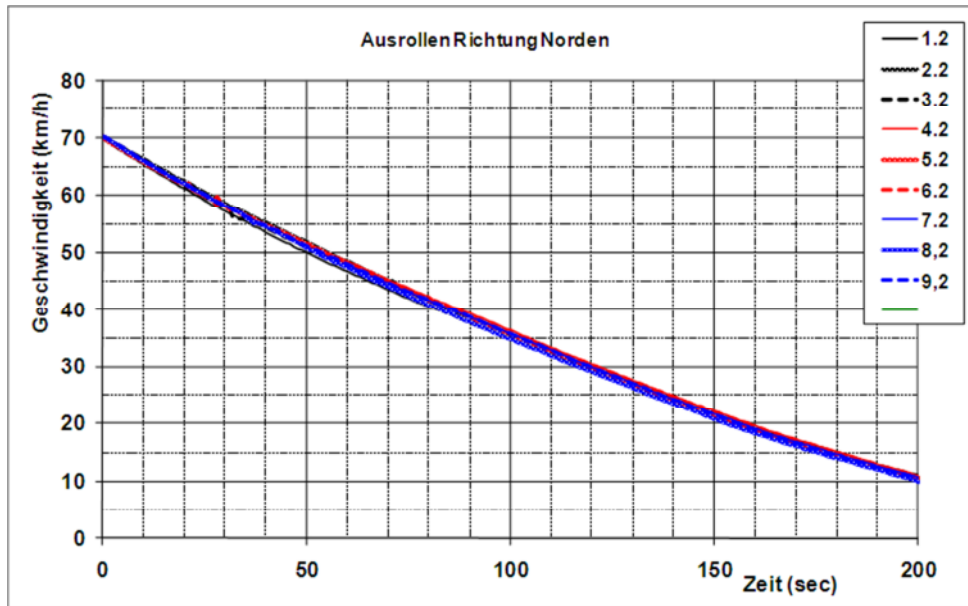


Abbildung 12: Ausrollkurve Hybrid, Richtung Norden

Die Daten wurden mit einer Frequenz von 100 Hz aufgezeichnet. Dabei wurden die Fahrzeuge aus ca. 80 km/h (Fahrstufe N) auf dem Prüfgelände jeweils bis zu zehnmal in beide Fahrtrichtungen ausgerollt. Die Fahrten wurden jeweils aufeinanderfolgend durchgeführt und die Ergebnisse anschließend gemittelt.

4.1.4 Beurteilung des Ladezustandes des Energiespeichers

Um die über den Zyklus abgegebene CO₂-Emission bzw. den Kraftstoffverbrauch möglichst exakt bestimmen zu können, ist es notwendig, ausreichende Kenntnisse über den Ladezustand der Energiespeicher (Batterien oder Dünnschichtkondensatoren / Supercaps oder Ultracaps) vor und nach Durchfahren eines Messzykluses auf dem Rollenprüfstand zu erlangen.

Wird über einen Zyklus mehr elektrische Energie verbraucht als durch den Verbrennungsmotor erzeugt wird, folgt daraus eine fehlerhafte (zu geringe) Betrachtung des Kraftstoffverbrauches bzw. der CO₂-Emission eines Hybridfahrzeuges. Die tatsächlich für die Erzeugung der elektrischen Energie aufgebrauchte Dieselmenge (chemisch-thermodynamische Energie minus Wirkungsgrad = verbrennungsmotorische Energie) findet bei einem solchen Vorgehen dann keine Betrachtung und muss entsprechend korrigiert werden. Eine ähnlich fehlerhafte Betrachtung fällt an, sollte zu viel Energie über einen Zyklus gespeichert werden, da dann das Gesamtsystem mehr Energie als für den Zyklus notwendig erzeugt hat. Ist die Differenz im Ladezustand des Energiespeichers vor und nach einem Zyklus gleich Null ist keine Korrektur notwendig. Über die Lebensdauer eines Fahrzeugs ist davon ausgehen, dass die Differenz im Ladezustand ausgeglichen (gleich Null) ist.

Als Ladezustand / state of charge (SoC) können sinnvoll nur zwei Zustände definiert werden:

- Entladen (leer), für „klassische“ Batterien kritisch
- Geladen (voll), zwischen ca. 80 und 100 Prozent Kapazität

Maßgebend hierzu ist die Aussage der integrierten Ladeelektronik des Fahrzeugs. Zur besseren Reproduzierbarkeit sollte nur der geladene (volle) Zustand berücksichtigt werden. Bei Supercaps (Doppelschicht-Kondensatoren) wie auch bei Akkumulatoren, ist die anliegende Spannung ein direktes Maß für den jeweiligen Ladezustand.

Alternativ kann zur Messung und Definition des Ladezustandes wie folgt vorgegangen werden:

1. Messung aller elektrischen Ströme und Spannungen (in allen drei Drehstromphasen) im Fahrzeugantrieb und / oder Zyklus.
2. Die Ergebnisse von Kraftstoffverbrauch C (l/100 km) und CO₂-Emission M (g/km) dieser Messung werden unter Berücksichtigung der Ladebilanz ΔE_{Batt} des Energiespeichers korrigiert.

Die korrigierten Werte C0 (l/100 km) und M0 (g/km) sollten einer Ladebilanz von null ($\Delta E_{\text{Batt}} = 0$) entsprechen; sie werden mit Hilfe eines Korrektorkoeffizienten korrigiert, der zusätzlich bestimmt werden muss. Bei anderen Speichersystemen als elektrischen Batterien steht ΔE_{Batt} für $\Delta E_{\text{Storage}}$ (Ladebilanz des elektrischen Energiespeichers). Die während der Dauer der Prüfung gemessenen Stromwerte sind zu integrieren, wodurch sich der Messwert Q, ausgedrückt in Amperestunden (Ah), ergibt. Am Ende des Zyklus wird dann aus den gemessenen Strömen und Spannungen ein ΔE_{Batt} bestimmt.

Zur eigentlichen Auswertung kann dann wie folgt vorgegangen werden.

Es gilt: (1)
$$\Delta E_{\text{Batt}} = \Delta E_{\text{Storage}} = W_{\text{in}} - W_{\text{out}} = (U \cdot I \cdot t)_{\text{in}} - (U \cdot I \cdot t)_{\text{out}}$$

Ist $\Delta E_{\text{Batt}} \neq 0$ muss ein Korrekturfaktor bestimmt und mit den Messdaten verrechnet werden. Dazu muss ein Zusammenhang zwischen Kraftstoffverbrauch und der Ladung des Energie-speichers hergestellt werden. Der eigentliche Lade- und Entladewirkungsgrad der Batterie wird bei dieser Betrachtung ignoriert. Da dieser Wirkungsgrad stets kleiner 100 Prozent ist eine solche Betrachtung relativ fehlerbehaftet. Lade- und Entladewirkungsgrad kommen zusammen eher in den Bereich 80 bis 90 Prozent, zuzüglich der Verluste in der Leistungselektronik. Der zu betrachtende Fehler wird umso größer, je größer die Batterie / der Energiespeicher ist. Um diesen Umstand zu berücksichtigen, wäre es denkbar, die Herstellerangaben zu den jeweiligen Wirkungsgraden (η_{lade} , η_{entlade}) mit zu betrachten, um obige Formel wie folgt zu ergänzen:

(2)
$$\Delta E_{\text{Batt}} = \Delta E_{\text{Storage}} = (W_{\text{in}} - W_{\text{out}}) \cdot \eta = [\eta_{\text{lade}} \cdot (U \cdot I \cdot t)_{\text{in}} - \eta_{\text{entlade}} \cdot (U \cdot I \cdot t)_{\text{out}}]$$

Dieser Wirkungsgrad könnte auch durch mehrmaliges „voll entladen“ und „voll laden“ und gleichzeitiger Bilanzierung der Stoffströme / Energieströme (Stromfluß in den / aus dem Energiespeicher) aufwändig bestimmt werden. Im Hinblick auf die Dauerhaltbarkeit ist auch die Änderung der Speicherkapazität (State of Health) von einigem Interesse, die über die oben beschriebenen Wirkungsgradbetrachtungen, entsprechende Langzeitdaten voraus-gesetzt, mit abgedeckt werden könnte.

Der Korrekturkoeffizient für den Kraftstoffverbrauch könnte aus einer Reihe von n Messungen bestimmt werden. Diese Reihe sollte mindestens eine Messung mit $Q_i < 0$ und mindestens eine mit $Q_j > 0$ enthalten. Kann die letztgenannte Bedingung bei dem in dieser Prüfung durchgeführten Fahrzyklus nicht erfüllt werden, muss die statistische Signifikanz der Extrapolation beurteilt werden, die zur Bestimmung des Kraftstoffverbrauchswerts bei $\Delta E_{\text{Batt}} = 0$ vorgenommen werden muss.

Der Korrekturfaktor entspricht dabei der Menge Kraftstoff, die notwendig ist, um den Energiespeicher auf dasselbe Niveau zu laden wie vor dem Zyklus.

Wie bereits gesagt, ist es ideal, wenn das Verhältnis der elektrischen und verbrennungs-motorsichen Arbeit über dem jeweiligen Zyklus neutral zueinander wäre. Dann könnte auf die Betrachtung des Ladezustandes verzichtet werden.

Innerhalb des Vorhabens wurde auf eine Korrektur des Ladezustandes verzichtet. Zum einen war es wegen des engen Zeitrahmens für die Messungen und den aus verschiedenen Betreiberflotten entnommenen Fahrzeugen nicht möglich, entsprechende Messtechnik zur Aufnahme der relevanten elektrischen Betriebsgrößen zu installieren. Zum anderen ergaben gemeinsam mit den Fahrzeugherstellern durchgeführte Betrachtungen, dass in den verwendeten Zyklen eine maximale Ladedifferenz von 1 bis 2 Prozent zu beobachten war, die für den weiteren Projektverlauf vernachlässigt wurde.

Darüber hinaus verfügten zwei der drei Hybridbusse über Super- bzw. Ultracaps als Energiespeicher. Solche Kondensatoren können als Energie-Kurzzeitspeicher bezeichnet werden, für die eine Korrektur des Ladezustandes über einen Zyklus als nicht relevant betrachtet werden kann

4.1.5 Rekuperation im Realbetrieb / Rekuperation auf dem Prüfstand

Wird die mechanische Betriebsbremse parallel zur elektrischen Bremse (Rekuperation) betrieben, wird die von nicht rollenden Achsen im realen Betrieb aufgebrachte Bremskraft eventuell zusätzlich rekuperiert, d.h. es wird zu viel Bremsenergie rückgewonnen (positiver Effekt für Hybridfahrzeug). Dieser Effekt wird durch die auf dem Rollenprüfstand nicht vorhandene Verschiebung der Achslastverteilung beim Bremsen in Richtung Vorderachse nochmals, wenn auch in nur geringem Maß, verstärkt, da die Antriebsachse(n) nicht entlastet werden und sich somit weniger Schlupf an den Antriebsrädern als im Realbetrieb ergibt. Abbildung 13 zeigt die Antriebs- und Bremskräfte bei Straßenfahrt exemplarisch für einen 18m Bus.

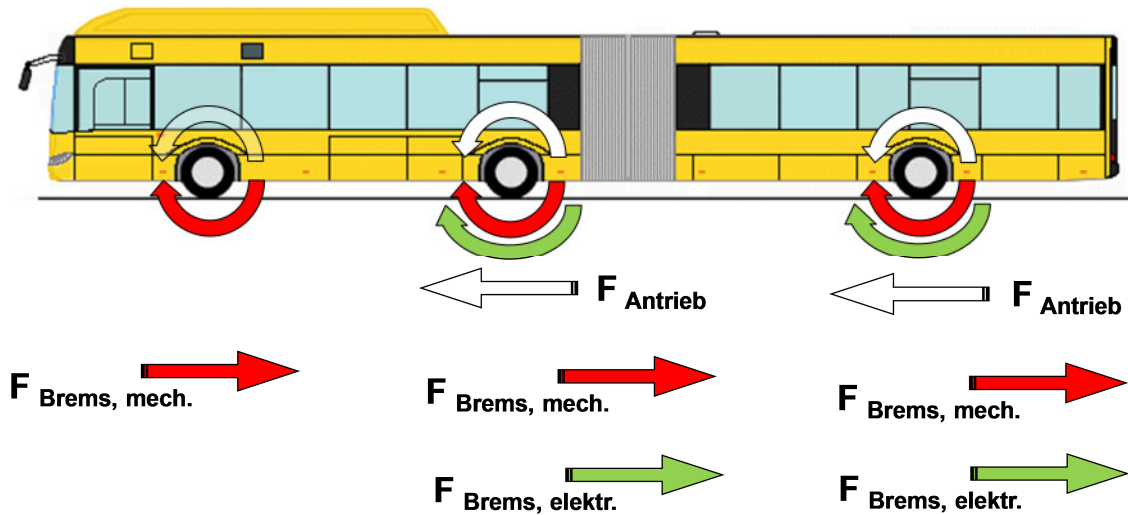


Abbildung 13: Antriebs- und Bremskräfte am 18m Bus bei Straßenfahrt

Bei realer Straßenfahrt wirken hier die Antriebskräfte F_{Antrieb} auf die beiden Antriebsachsen des Hybridbusses. Wird nun eine Verzögerung (Abbremsung) eingeleitet, wird das hybride Konzept in aller Regel so ausgelegt sein, dass zunächst rein elektrisch verzögert wird, um so ein Höchstmaß an Bremsenergieerückgewinnung bzw. Rekuperation ($F_{\text{Brems, elektr.}}$) zu ermöglichen. Geht die angeforderte Verzögerung über die per Rekuperation zu realisierende Bremskraft hinaus, wird zusätzlich mechanisch über die Betriebsbremse mit $F_{\text{Brems, mech.}}$ verzögert.

In wie fern eine serielle (erst $F_{\text{Brems, elektr.}}$ dann $F_{\text{Brems, mech.}}$) oder parallele ($F_{\text{Brems, elektr.}}$ und $F_{\text{Brems, mech.}}$ zusammen) Verzögerung auftritt, hängt von der Auslegung des jeweiligen Antriebstrangs und der aufzubringenden Verzögerung ab.

Abbildung 14 zeigt einen 18 m Bus auf einem Rollenprüfstand mit zwei angetriebenen Rollensätzen zur Aufnahme der Antriebsachsen. Die Vorderachse bleibt in diesem Fall unbewegt.

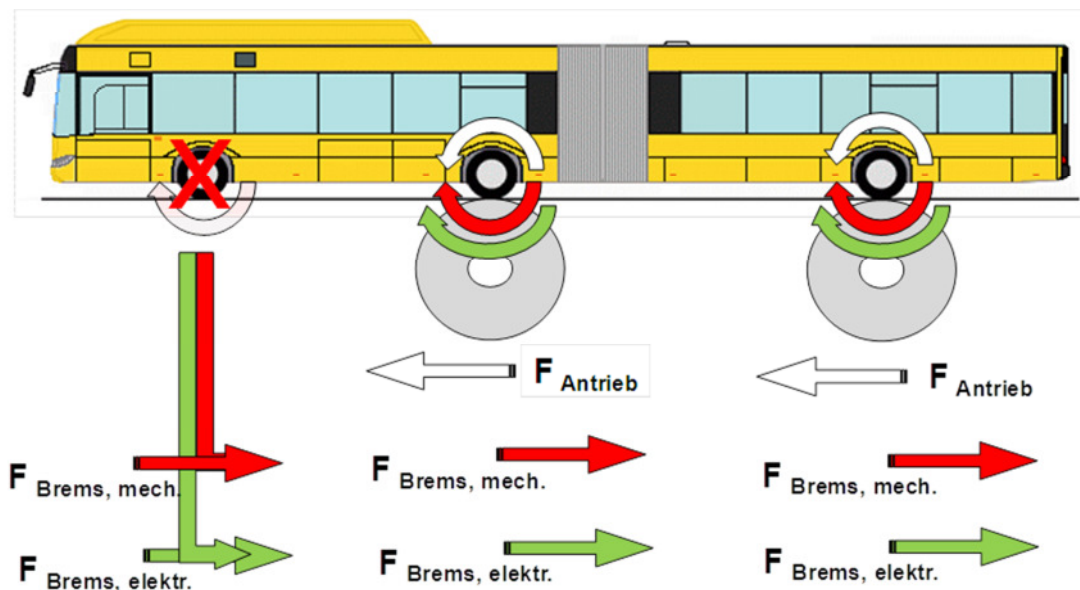


Abbildung 14: Antriebs- und Bremskräfte am 18m Bus Rollenprüfstand

In diesem Fall besteht nun je nach Auslegung des Antriebsstrangs die Möglichkeit, dass bei den innerhalb eines Fahrzyklus vorgegebenen Verzögerungen, die bei Straßenfahrt durch die Vorderachse aufgebrachte Bremskraft durch die Rekuperation an den Antriebsachsen kompensiert wird. D.h., es wird innerhalb des Fahrzyklus stärker rekuperiert als auf der Straße, da die Bremskraft der Vorderachse auf dem Rollenprüfstand nicht wirksam ist. Dies hätte Einfluss auf den Ladezustand des Energiespeichers (vergl. 4.5) und somit auch auf den ermittelten Kraftstoffverbrauch bzw. auf die ermittelte CO₂-Emission.

Ist der Antriebsstrang jedoch so ausgelegt, dass zunächst bis zu einem gegebenen Maximum rekuperiert wird und dann die mechanische Betriebsbremse zusätzlich angesprochen wird (seriell), kann keine zusätzliche Bremsenergie zurückgewonnen werden, da bereits maximal rekuperiert wird. Die obigen Betrachtungen gelten prinzipiell auch für Solobusse mit zwei Achsen, sollte nur die Antriebsachse auf einem Rollensatz bewegt werden.

Im Begleitprogramm wurden die entsprechenden Bremskraftverteilungen (mechanisch / elektrisch) für die dreiachsigen Fahrzeuge aufgenommen, um eine etwaige „Über“-Rekuperation rechnerisch korrigieren zu können.

4.1.6 Ergebnisse der Verbrauchsmessungen

Die Ermittlung der Verbrauchswerte erfolgte im Braunschweig-Zyklus sowie in den SORT-Zyklen 1 bis 3 (vergl. Kapitel 4.1.1). Die Verbrauchsmessungen wurden unter der Voraussetzung durchgeführt, dass jeweils drei aufeinanderfolgende Messungen CO₂-Messwerte in einem Bereich von 2 Prozent aufzeigen mussten. Die heranzuziehenden Messbedingungen (CO₂-Messung, Zyklusfahrt) wurden in Anlehnung an die für PKW übliche CO₂-Bestimmung /7/ bzw. nach ISO 8178 gewählt.

Vor Beginn der eigentlichen Messungen wurden die Fahrzeuge sowie der Rollenprüfstand zum Erreichen beharrter Betriebstemperaturen konditioniert. Dies geschah durch eine 20minütige Konstantfahrt bei Geschwindigkeiten zwischen 60 km/h – 80 km/h sowie einem abschließenden Braunschweig-Zyklus.

Im Braunschweig-Zyklus erfüllten alle Fahrzeuge das geforderte Förderkriterium eines mindestens 20-prozentigen Minderverbrauchs für die Hybridfahrzeuge. Die Einsparungen gegenüber den Referenzbussen lagen je nach Modell zwischen 21,28 und 32,13 Prozent. Auch bei den SORT-Zyklen 1 und 2 wurde die 20-Prozent-Kriterium durch alle Fahrzeuge erfüllt. Lediglich im SORT 3 Zyklus wurde durch ein Modell die 20 Prozent Marke unterschritten. Tabelle 6 zeigt eine Zusammenfassung der Ergebnisse.

Tabelle 6: Prozentuale Einsparungen Hybridbus gegenüber Dieselreferenz bei den Verbrauchsmessungen

Verbr. (l/100km)	Hybrid 1			Hybrid 2			Hybrid 3		
	Ref.	Hybrid	%	Ref.	Hybrid	%	Ref.	Hybrid	%
Brauns.-Zyk.	58,94	46,28	<u>21,48</u>	58,94	46,40	<u>21,28</u>	39,93	27,10	<u>32,13</u>
SORT 1	75,05	51,52	<u>31,35</u>	75,05	53,09	<u>29,26</u>	47,31	35,69	<u>24,56</u>
SORT 2	58,72	44,77	<u>23,76</u>	58,72	45,05	<u>23,28</u>	38,65	29,52	<u>23,63</u>
SORT 3	53,84	42,78	<u>20,54</u>	53,84	44,73	<u>16,92</u>	35,37	28,28	<u>20,05</u>

4.2 Überprüfung der Funktion der Abgasnachbehandlung

Durch eine Referenzmessung sollte die Funktion der jeweilig verbauten Abgasnachbehandlungen an den Hybridfahrzeugen dokumentiert werden, um so bei eventuellen wiederkehrenden Messungen zu einem späteren Zeitpunkt Aussagen zum Abgas-Emissionsverhalten der Fahrzeuge in Abhängigkeit von der Laufzeit zu ermöglichen.

Für solche Messungen wurde in einem früheren BMU Vorhaben (Demonstrationsvorhaben „Anspruchsvolle Umweltstandards im ÖPNV-Wettbewerb“, 2001) in Zusammenarbeit mit verschiedenen Fahrzeugherstellern ein entsprechender Prüfablauf für den Rollenprüfstand erarbeitet.

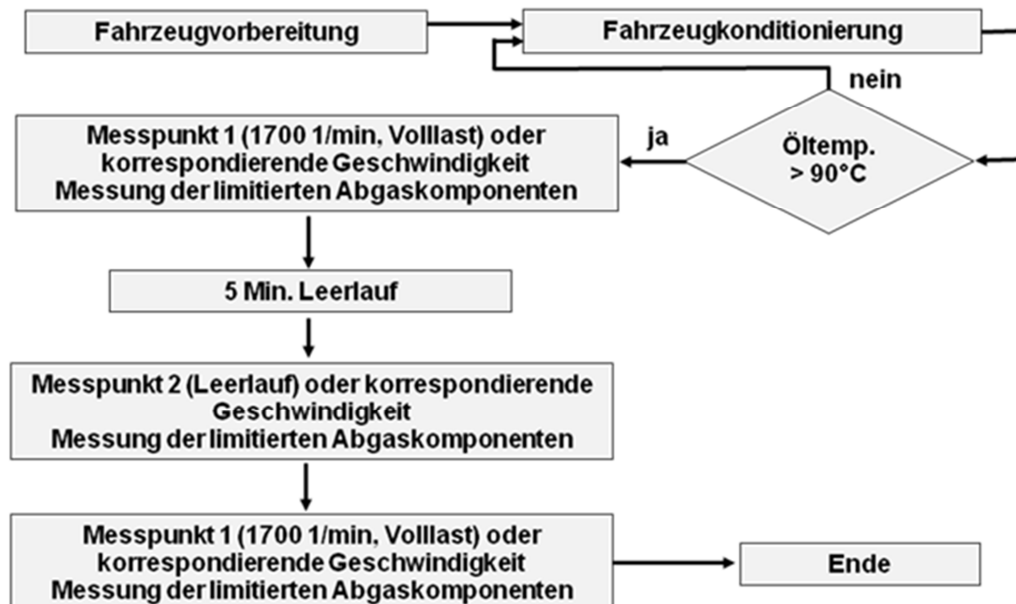


Abbildung 15: Ablaufplan Messung der limitierten Abgaskomponenten

Im Rahmen des Vorhabens wurden keine Wiederholmessungen durchgeführt, so dass auf die Darstellung der Referenzwerte aus den Konstantfahrten verzichtet wird. Im folgenden Kapitel 4.2.1 werden die Emissionsergebnisse in g/km für den Braunschweig-Zyklus und die gefahrenen SORT-Zyklen dargestellt.

4.2.1 Ergebnisse der Abgasmessungen

Im Folgenden werden die Ergebnisse der Abgasmessungen aus dem Braunschweig- und den SORT-Zyklen dargestellt. Die wiedergegebenen Abgaswerte zeigen die jeweils über die Zyklen gemittelten Abgasemissionen der limitierten gasförmigen Komponenten HC, CO, NO_x sowie für CO₂. Die Angabe der der Werte erfolgt in g/km.

Zusätzlich erfolgt die Angabe eines „Partikelmesswertes“ in mg/m³ (Ruß-Konzentration) ermittelt mit dem Partikelmessgerät MPM der Firma MAHA. Bei diesem System handelt es sich um einen laserbasierten Streulichtsensor, der nach Spezifikation eine höhere Auflösung als herkömmliche Opazimeter bietet. Die Messungen mit diesem System waren nach den Verdingungsunterlagen zum Vorhaben gefordert und können für weitere Forschungsvorhaben (z.B. Arbeitsgruppe Emissions 2010; VdTÜV, DEKRA, ZDK, ASA) entsprechende Verwendung finden. Die damit ermittelten Werte sind mit gravimetrisch ermittelten Partikel-emissionen nicht vergleichbar. Auf Grund der verbauten wanddurchströmten Diesel-Partikelfilter (DPF) wurde von sehr geringen Partikel-Massenemissionen ausgegangen und auf eine gravimetrische Partikelmessung verzichtet.

Insgesamt hielten alle untersuchten Hybridbusse die in Kap. 1 genannten Förderkriterien ein. Um auf bestimmte Effekte bei der Abgasnachbehandlung einzugehen, werden im Folgenden Auszüge aus den Messergebnissen für einige Fahrzeuge exemplarisch abgebildet.

Tabelle 7 zeigt exemplarisch die Ergebnisse der Abgasmessungen für einen Diesel-Referenzbus als Mittelwert über die jeweils dreimal gefahrenen Zyklen.

Tabelle 7: Abgasergebnisse Diesel-Referenzbus

	HC (g/km)	CO (g/km)	NO _x (g/km)	CO ₂ (g/km)	„Partikel“ (mg/m ³)
Brauns.-Zyk.	0,070	15,75	10,51	1.539,72	12,17
SORT 1	0,086	21,13	15,88	1.918,23	11,20
SORT 2	0,064	8,78	9,34	1.438,15	10,51
SORT 3	0,048	5,48	10,01	1.351,62	9,48

Im Vergleich zu den anderen untersuchten Bussen waren diese CO-Werte hier relativ hoch. Die kann letztendlich nicht erklärt werden, da durch die kurze Verfügbarkeit der Busse weiterreichende Untersuchungen nicht durchgeführt werden konnten. In vielen Fällen lassen sich erhöhte CO-Werte jedoch mit Luftmangel unter dynamischen Betriebsbedingungen erklären. Ein solcher Luftmangel könnte z.B. durch einen versotzten Turbolader verursacht werden. Dass die CO-Werte für den SORT 3-Zyklus deutlich geringer ausfallen als für die anderen Zyklen, spricht für einen solchen Effekt, da der SORT 3-Zyklus die geringste Dynamik aller SORT-Zyklen aufweist.

Die ebenfalls auf recht hohem Niveau liegenden NO_x-Werte weisen auf eine nicht ausreichende Harnstoffdosierung des SCR-Systems hin. Üblicherweise beginnt die Eindüsung bei SCR-Systemen ab einer Abgastemperatur, je nach Applikation und Auslegung, von ca. 200°C bis 250°C. Im hier vorliegenden Fall stellte sich bei konditioniertem (vergl. Kapitel 4.1.6) Fahrzeug eine mittlere Abgastemperatur am Endrohr von ca. 200°C über den Zyklus ein, so dass von einer entsprechend höheren Temperatur vor

dem SCR-System ausgegangen wurde. Dennoch scheint keine ausreichende Eindüsung stattgefunden zu haben.

Solche Effekte sind aus anderen Arbeiten /10, 11, 12, 13/ bekannt und zeigen hier erneut die starke Temperaturabhängigkeit von herkömmlichen SCR-Systemen auf. Abbildung 28 zeigt den Temperaturverlauf des Diesel-Referenzfahrzeugs über den Braunschweig-Zyklus. Es ist zu erkennen, dass die Abgastemperatur am Endrohr nach Konditionierung im ersten Teil des Zyklus zunächst leicht abnimmt, um dann auf Werte oberhalb 200°C anzusteigen. Am Ende des Zyklus nimmt die Temperatur wiederum erneut leicht ab.

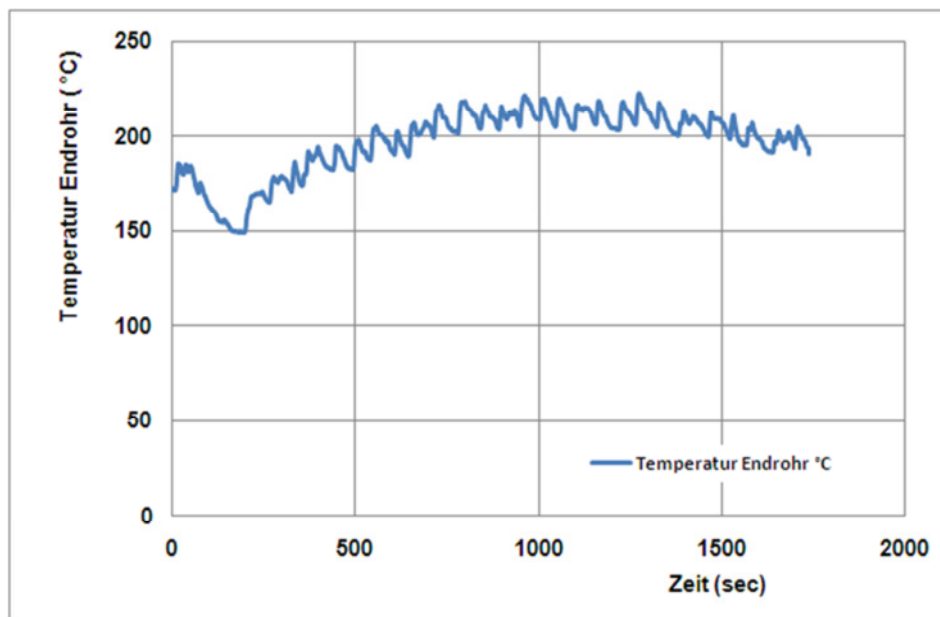


Abbildung 16: Abgastemperatur Braunschweig-Zyklus (Diesel-Referenz)

Im Vergleich zu dem betrachteten Diesel-Referenzbus zeigt der dazugehörige Hybridbus über den Braunschweig-Zyklus günstigere Emissionswerte (Tabelle 8). Die CO- und HC-Werte liegen im für nachbehandeltes Abgas zu erwartenden Größenordnungen. Die NO_x-Emission liegt im Braunschweig-Zyklus ebenfalls auf niedrigem Niveau. Abbildung 17 zeigt die Abgastemperatur des Hybridbusses im Vergleich zur Diesel-Referenz. Die Temperatur für den Hybrid liegt höher als beim Diesel. Da die NO_x-Emissionen in diesem Fall deutlich niedriger liegen, kann von einer entsprechenden Funktion des SCR-Systems ausgegangen werden.

Tabelle 8: Abgasergebnisse Hybridbus 1

	HC (g/km)	CO (g/km)	NO _x (g/km)	CO ₂ (g/km)	„Partikel“ (mg/m ³)
Brauns.-Zyk.	0,013	0,100	3,03	1228,24	0,83
SORT 1	0,020	0,130	9,45	1264,59	1,61
SORT 2	0,017	0,067	7,71	1134,46	2,21
SORT 3	0,013	0,050	3,80	1135,58	0,54

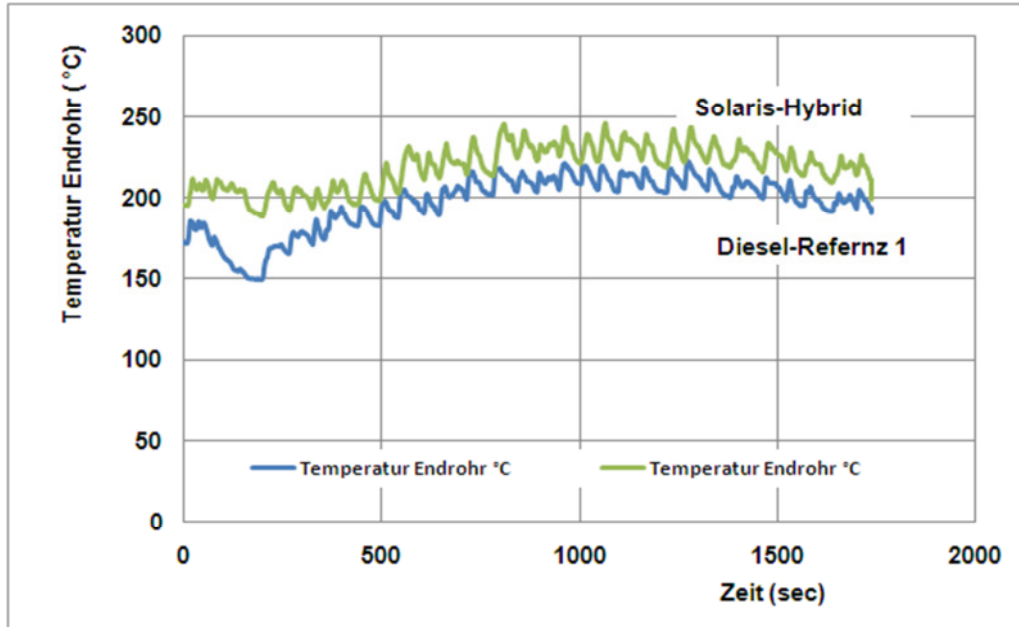


Abbildung 17: Vergleich Abgastemperatur Braunschweig-Zyklus Hybridbus 1

Bei Betrachtung der NO_x -Emissionen aus allen Zyklen fällt auf, dass die Werte für den SORT 1- und SORT 2-Zyklus auch auf erhöhtem Niveau liegen. Auch hier ist der Grund im Temperaturverlauf über die Zyklen und den damit verbundenen SCR-Funktionalitäten verbunden.

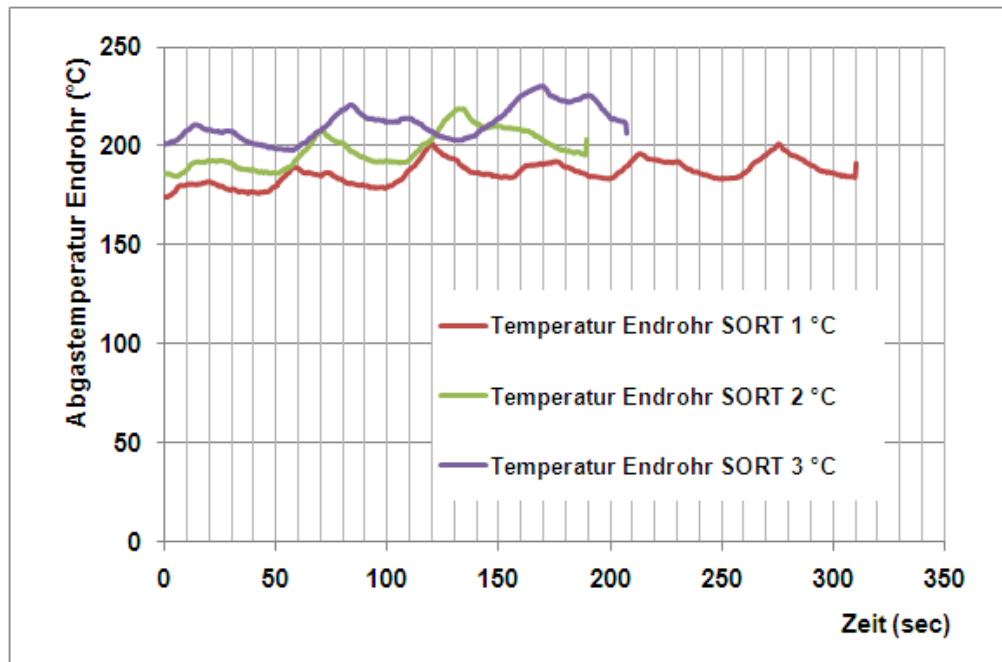


Abbildung 18: Vergleich Abgastemperatur SORT-Zyklen

Für den SORT 1- und SORT 2-Zyklus liegen die Temperaturen bei Werten unterhalb 200 °C (Abbildung 18). Bei diesen Temperaturen kann erneut davon ausgegangen werden, dass keine bzw. keine vollständige SCR-Funktionalität gegeben ist; es wird keine bzw. wenig Reagenz eingedüst, die NO_x -Emissionen entsprechen annähernd den Roh-Emissionen des Motors.

Bei unzureichender Abgastemperatur an der Eindüsungsstelle kann der Harnstoff in der Reagenz (AdBlue) unter etwa 180 °C nicht bzw. bei etwas höherer Temperatur nur langsam in Ammoniak umgewandelt werden (Thermolyse nur eingeschränkt). Ein Eindüsen unter ca. 200 °C verbessert daher die NO_x-Minderung nicht, kann aber zu Ablagerungen und damit verbundenen Funktionsstörungen in der Eindüsung führen. Auch die SCR-Katalysatoren erreichen erst bei über 250 °C ihre volle Umsatzrate. Höhere Ammoniakmengen als für die jeweils maximale Umsatzrate erforderlich sind, führen zu keinen nennenswerten Verbesserungen der Umsatzraten. Für eine bessere Funktion sind daher bauliche Maßnahmen (z.B. kurze Abgaswege, Isolation) und motorseitige Maßnahmen (Abgastemperatur heben) erforderlich. Solche Maßnahmen (Thermomanagement) werden sich aber erst ab der Grenzwertstufe Euro VI (2013) im Feld zu finden.

Für den SORT 3-Zyklus liegt das Temperaturniveau oberhalb 200 °C. Im Vergleich der NO_x-Emissionen (Tabelle 9) scheint diese Temperatur (applikationsbedingt) auszureichen, Eindüungsbedingungen zu schaffen, da die NO_x-Emission für den SORT 3-Zyklus in etwa vergleichbar mit dem Wert aus dem Braunschweig-Zyklus ist.

Tabelle 14 zeigt die Zyklusergebnisse für einen anderen Hybridbus. Auch hier fallen die erhöhten NO_x-Emissionen auf. Als Erklärung kann wiederum eine fehlende SCR-Funktionalität herangezogen werden, wie aus Abbildung 31 erkennbar ist. Abbildung 31 zeigt den Verlauf der Abgastemperatur am Endrohr und der Motordrehzahl über den Braunschweig-Zyklus.

Tabelle 9: Abgasergebnisse Hybridbus 2

	HC (g/km)	CO (g/km)	NO _x (g/km)	CO ₂ (g/km)	„Partikel“ (mg/m ³)
Brauns.-Zyk.	0,0120	0,0242	11,73	1231,53	4,45
SORT 1	0,0154	0,0416	11,85	1409,12	1,25
SORT 2	0,0106	0,0200	9,96	1198,01	1,02
SORT 3	0,0106	0,0220	11,13	1187,23	0,97

Der Verlauf der Temperaturkurve zeigt hier eine andere Charakteristik als bei dem oben betrachteten Hybridfahrzeug. Die Temperatur innerhalb des SCR-Systems fällt hier während der Motor-Stillstandszeiten (Start-Stopp-Automatik) stark ab und führt zu ausbleibender SCR-Funktionalität. Prinzipiell ist hierzu jedoch zu sagen, dass eine Start-Stopp-Automatik als eher vorteilhaft für SCR-Systeme zu betrachten ist, da die Leerlauf-Abgastemperaturen bei Dieselmotoren so niedrig sind, dass sie ein Auskühlen des SCR-Systems mehr fördern denn verhindern. Der Abkühleffekt fällt ohne Abgasmassenstrom in der Regel viel geringer aus. Allerdings kann die Regelung der Reagens-Dosierung dann etwas problematischer ausfallen, da konventionelle Systeme für Start-Stopp-Dosierung nicht passend bedatet sein dürften.

Der sich hier am Endrohr einstellende starke Abfall der Temperatur gilt so sicherlich nicht für die eigentliche Temperatur im SCR-System. Innerhalb des SCR-Systems wird der Temperaturabfall auf Grund der Temperaturspeicherfähigkeit geringer ausfallen als am Endrohr. Dort kühlt die Temperaturmessstelle wegen der notwendigen Abgasab-

saugung auf dem Rollenprüfstand schnell ab. Die gemessenen Temperaturwerte bei Motor-Aus sind also nur bedingt aussagekräftig. Auch kurz nach Wiedereinschalten ist im SCR ein deutlich höheres Temperaturniveau zu erwarten als im Endrohr gemessen. Bei Motorbetrieb stellt sich dann schnell wieder eine hohe Temperatur ein. Die relativ hohen NO_x-Emissionen dürften hier daher eher auf eine nicht für den Stadtbusbetrieb optimierte SCR-Applikation zurückzuführen sein.

4.3 Überprüfung der Geräuschemissionen

4.3.1 Außengeräusche

Die Verfahren zur Ermittlung der Außengeräuschemissionen von Kraftfahrzeugen unterscheiden nicht nach Antriebskonzepten. Die DIN ISO 362 beschreibt das Verfahren, wie die Geräuschemissionen von Kraftfahrzeugen mit Verbrennungsmotoren unter definierten Vollastbedingungen zu messen sind. Selbiges gilt für die Messung des Rundumgeräuschs nach Anlage XX, StVZO. In einer sogenannten "Monitoring Phase" befindet sich zurzeit das Verfahren nach DIN ISO 362-1. Bei diesem Verfahren gilt das Hauptaugenmerk nicht mehr der maximalen Geräuschentwicklung des Motors, sondern der Geräuschemission des Fahrzeugs bei normalen Betriebsbedingungen im Stadtverkehr. Aber auch hier gibt es keine Differenzierung nach Antriebskonzepten.

Ziel des Arbeitspaketes 3 war es, die Geräuschemissionen von Bussen mit Hybridantrieb zu erfassen. Hierzu wurden zum einen einsatztypische Fahr- und Betriebsbedingungen berücksichtigt (An- und Abfahrt an eine Haltestelle), zum anderen aber auch die zur Typprüfung solcher Fahrzeuge notwendigen Messungen durchgeführt. Diese Messungen erfolgten auf geeigneten Belägen und abgesperrten Teststrecken (vergl. 4.3.1). Zusammengefasst wurden folgende Messungen an den Fahrzeugen durchgeführt:

1. Ab- / Anfahren Haltestelle
2. Vorbeifahrt mit konstanter Geschwindigkeit bei 30, 40, 50, 60 km/h
3. Typprüfwert gemäß ECE (R.51), Anhang 3 und 10 (alt / neu)
4. Standgeräusch gemäß ECE (R.51)
5. Rundumgeräusch gem. StVZO, Anlage XX
6. Druckluftgeräusche.

Die Messungen wurden an je einem Hybridbus und einem Diesel-Referenzfahrzeug durchgeführt. Die Messstrecke verfügt über ein Zertifikat nach ISO 10844 „Vorschriften für das Prüfgelände“ und ist als ISO-Geräuschmessstrecke anerkannt. Abbildung 34 zeigt den MAN Hybridbus auf dem Testgelände.



Abbildung 19: ISO-Geräuschmessstrecke der ATP in Papenburg

Hybrid-Fahrzeuge können insbesondere auf Stadtlinien, die durch häufiges „Bremsen“ und „Anfahren“ gekennzeichnet sind, einen hohen Anteil der Bremsenergie für einen darauffolgenden Anfahrvorgang zurückgewinnen. Je nach Auslegung und Herstellerstrategie wird dieser Anfahrvorgang dann für eine kurze Zeit rein elektrisch oder mit wesentlicher Unterstützung des elektrischen Systems durchgeführt, so dass der Antriebsmotor in einem niedrigeren Drehzahlbereich und/oder einem optimalen Verbrauchskennfeldpunkt angefahren werden kann. Ein niedrig belasteter Motor oder eine abgesenkte Motordrehzahl führen in der Regel auch zu einem niedrigeren Antriebsgeräusch, sofern durch das elektrische System keine zusätzliche Geräuschquelle aufgeschaltet wird.

4.3.1.1 Aufbau der Messtechnik

Der Messaufbau entsprach den Vorgaben der Anlagen zur ECR R.51/02. Er wurde um sechs weitere Mikrofone auf der rechten Fahrtrichtungsseite erweitert. Diese Mikrofone wurden in einem Abstand von 5m zueinander aufgestellt (Abbildung 20). Somit war es möglich, insbesondere die An- und Abfahrtsituation im Haltestellenbereich näher aufzulösen und aus verschiedenen „Blickwinkeln“ zu betrachten. Zur quantitativen Beurteilung der so gewonnenen Messwerte wurden die zusätzlichen Mikrofone auch in einer Entfernung von 7,5m zur Fahrlinie aufgestellt.

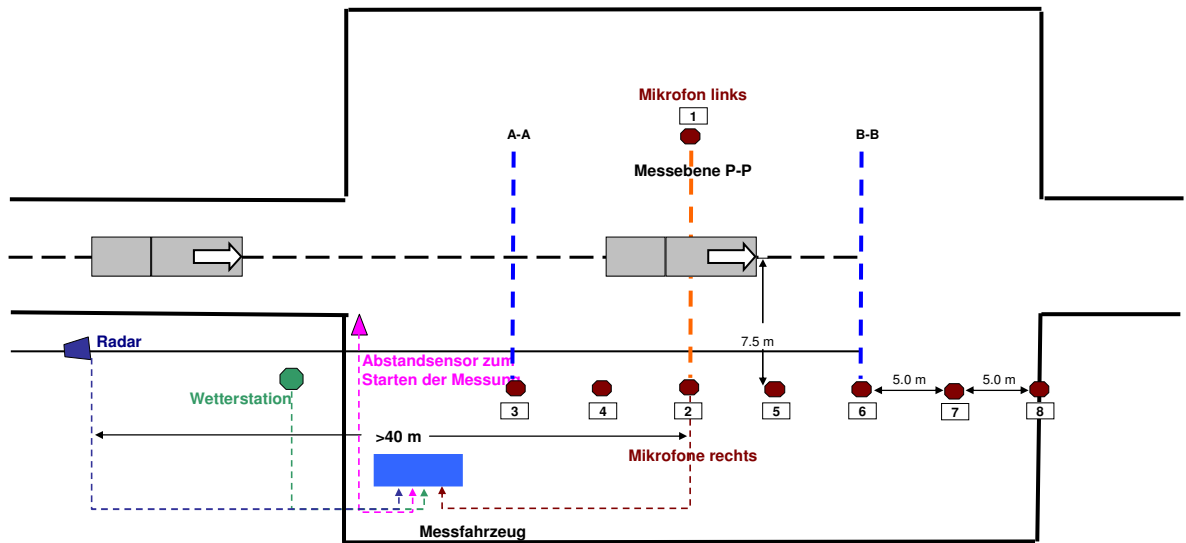


Abbildung 20: Messanordnung zur Erfassung der Außengeräusche

Zur Ermittlung des Rundumgeräusches wurde die Messanordnung entsprechend der ECE-Vorgaben (Anlage XX, ECE R.51/02) in der Messebene der Geräuschesmesstrecke aufgebaut (Abbildung 21). Hierbei wurden die Mikrofone M1-M8 in einem Abstand von 7m zum Fahrzeugaufbau und in einer Höhe von 1,2m über der Fahrbahn symmetrisch um das Fahrzeug verteilt. Abbildung 37 zeigt einen Gelenkhybridbus bei der Rundumgeräuschvermessung.

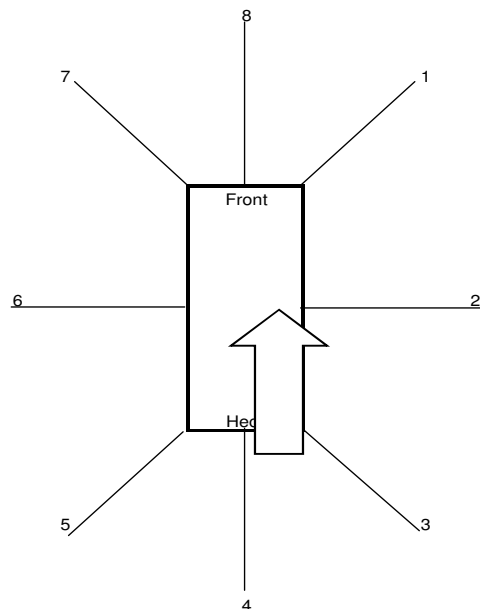


Abbildung 21: Anordnung der Messpunkte für die Messung des Rundumgeräusches



Abbildung 22: Rundumgeräuschvermessung

Zur Messwertaufnahme wurden folgende Geräte eingesetzt:

- 8 Messmikrofone Microtech Gefell MG MV 210
- Kalibrator (94db bei 1000Hz) Brüel & Kjaer Typ 4231
- Messdaten Erfassungs- und Analysesystem Pulse Brüel & Kjaer Typ 3039 & 7537A
- Radargerät Radarlux DR24-V16F
- Wetterstation Reinhardt MWS 6

Für die Fahrmessungen wurde die Datenaufnahme durch den Impuls der Startlichtschranke ausgelöst, wenn sich die Fahrzeugfront in einer Entfernung von 10 m zum Beginn der Beschleunigungsstrecke bei A – A' befand (vergl. Abbildung 35). Bei allen Messungen erfolgte die Datenaufnahme mit einer Abtastrate von 100 Hz.

Die Geräuschmessungen wurden an den fünf Bussen durchgeführt, die auch zu den Rollenprüfstandsmessungen zur Verfügung standen. Alle Busse entsprachen der Fahrzeugklasse M3 mit einer Nennleistung größer 150 kW.

4.3.1.2 Ergebnisse der Außengeräuschmessungen

Für eine regelwerkskonforme Außengeräuschmessung müssen trockene Wetterbedingungen vorliegen. Diese lagen zu den verschiedenen Messterminen vor. Die Busse wurden vor den Messungen auf dem Teststreckengelände auf Betriebstemperatur konditioniert. Luft und Streckentemperatur wurden während den Messungen überwacht und mittels Tageswetterprotokollen aufgezeichnet. Während den Messungen betrug die Lufttemperatur zwischen 15 und 30° Celsius. Die Windgeschwindigkeiten lagen auch in Böen unter dem für eine Typprüfmessung zulässigen Grenzwert von 5 m/sec.

Ergebnisse der Messungen nach ECE R.51/02, Anhang 3

Die Messergebnisse der beschleunigten Vorbeifahrt nach ECE R.51/02, Anhang 3 („altes Verfahren“ bzw. Messverfahren A) lagen bei den Hybridbussen zwischen 74 und 78 dB(A). Dabei ist zu erkennen, dass alle Busse ihren gesetzlich geforderten Grenzwert von 80 dB(A) einhalten. Die Maximalpegel der Dieselfahrzeuge wurden ausschließlich auf der rechten Fahrzeugseite gemessen, obwohl alle Busse ihre Abgase links oder zentral hinten ausführten.

In Abbildung 39 ist beispielhaft der Schallpegelverlauf einer beschleunigten Vorbeifahrt dargestellt. Es ist zu erkennen, dass das Pegelmaximum dann auftritt, wenn mehr als die Hälfte der Fahrzeuglänge die Mikrofonebene P-P passiert hat (Summierung von Antriebs- und Rollgeräusch).

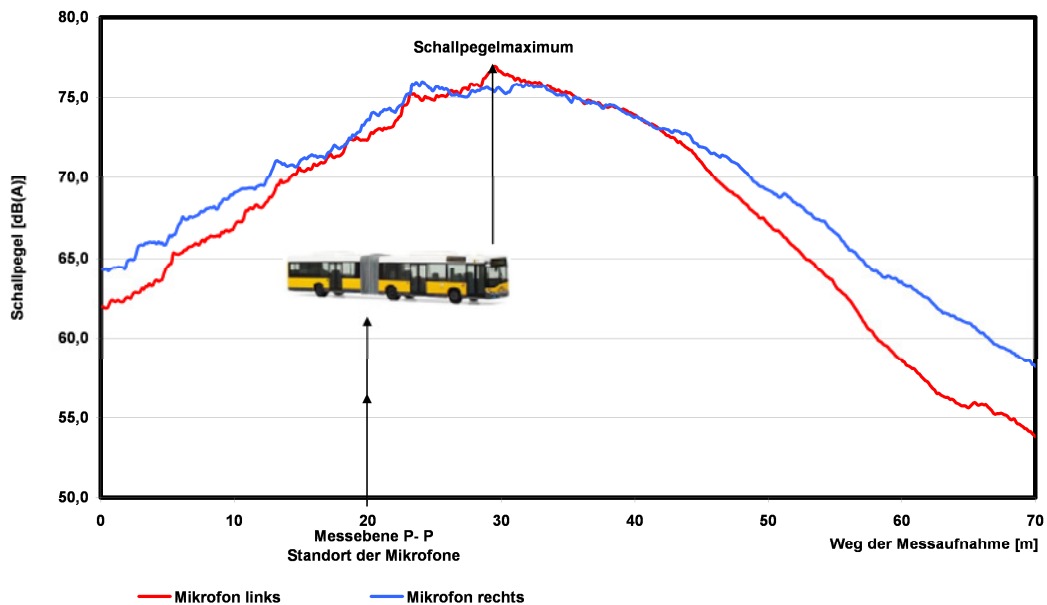


Abbildung 23: Schalldruck bei der beschleunigten Vorbeifahrt

Ergebnisse der Standgeräuschmessungen

Das Standgeräusch dient im Feld zur Kontrolle des Geräuschniveaus. Es wird bei $\frac{3}{4}$ der Nenndrehzahl des Antriebsmotors bestimmt und ist gesetzlich nicht limitiert. Die Messungen ergaben eine gute Übereinstimmung der Standgeräuschmessungen.

Ergebnisse der Messungen nach ECE R.51/02, Anhang 10

Zusätzlich zur Aufnahme der Fahrgeräuschwerte nach Anhang 3 der ECE R.51/02, Anhang 3 wurden die Busse nach dem neuen Messverfahren (Messverfahren B) des Anhangs 10 besagter Richtlinie vermessen (Tabelle 19). Da alle Fahrzeuge über automatische Getriebe ohne Einzel-Gangvorwahl verfügten, wurden sie gemäß der Vorgaben in der Dauerfahrstufe (Fahrstufe D) aus der Anfahrtschwindigkeit in Ebene

A-A beschleunigt, für die eine Ausfahrtsgeschwindigkeit von 35 ± 5 km/h erreicht werden muss. Abbildung 41 zeigt die gemessenen Maximalschallpegel im Vergleich der beiden Messmethoden A (vergl. Kapitel 4.3.1) und B.

Es ist zu erkennen, dass das „neue“, zur Zeit noch nicht mit Grenzwerten belegte, Verfahren nach Anhang 10 bis zu mehr als 2 dB(A) günstigere Werte liefern kann als das Verfahren nach Anhang 3.

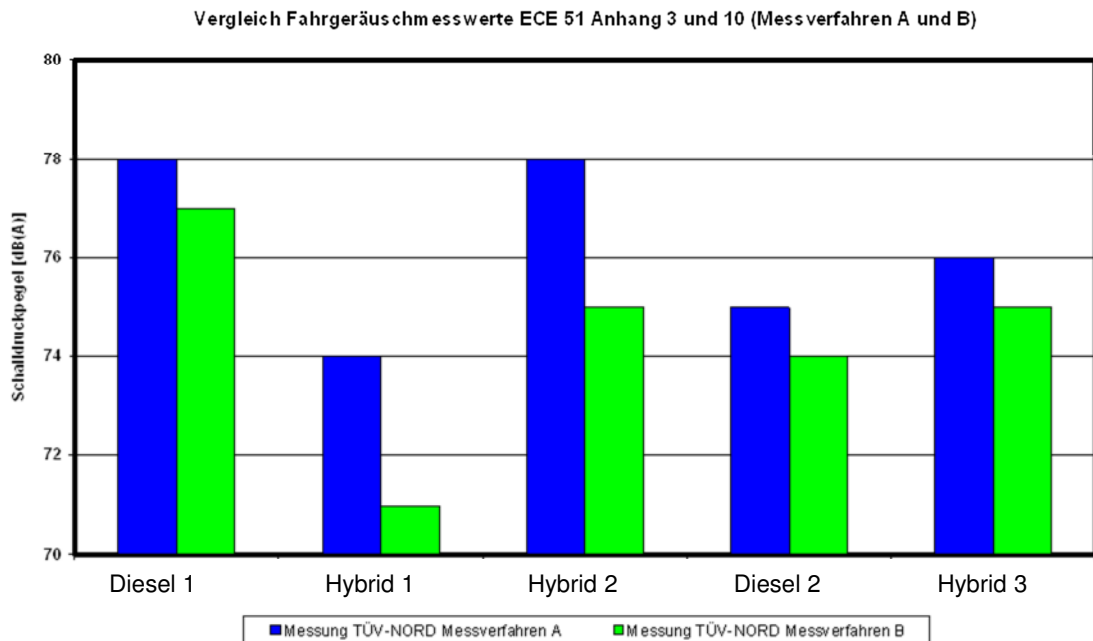


Abbildung 24: Vergleich der Maximalschalldruckpegel (Messmethode A und B)

Die folgende Abbildung 45 zeigt exemplarisch einen Vergleich der Messwertaufnahmen (Rohsignal) der beiden Messmethoden für ein Hybridfahrzeug. Der zu erkennende Pegelunterschied liegt zum einen in den verschiedenen Einfahrtsgeschwindigkeiten (Messmethode A 50km/h; Messmethode B ca.30 km/h) und zum anderen in den unterschiedlich definierten Beschleunigungspunkten der beiden Verfahren begründet.

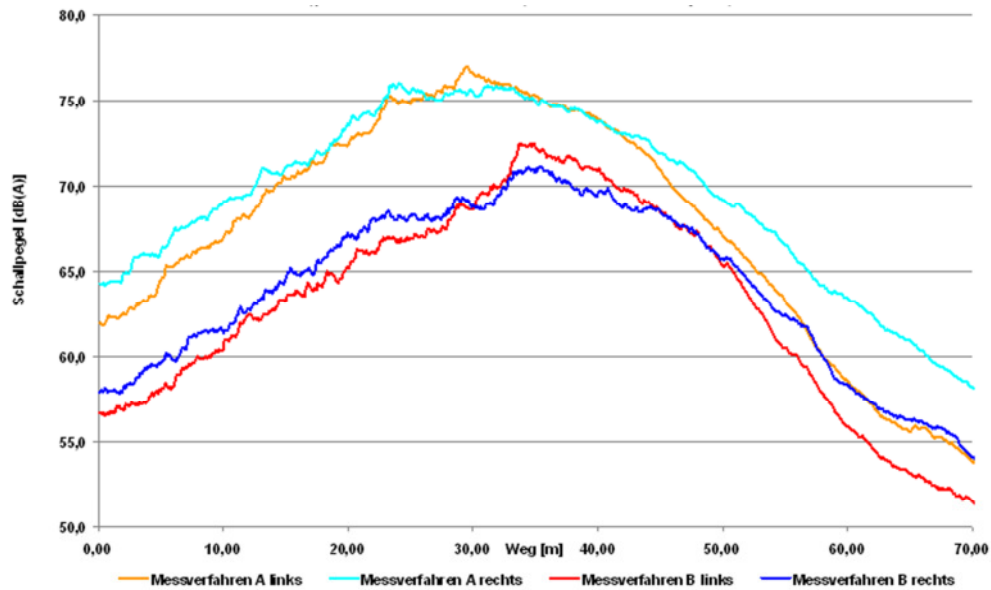


Abbildung 25: Vergleich der max. Schallpegel bei einem Hybridbus

Ergebnisse der Rundumgeräuschmessungen

Die Rundumgeräuschmessungen in 7 m Abstand vom Fahrzeugumriss lehnen sich an die ehemaligen Kriterien für lärmarme Kraftfahrzeuge an. Hier durften 80 dB(A) für das Motorgeräusch und 72 dB(A) für die Druckluftgeräusche nicht überschritten werden. Beim Beschleunigungsstoß wurde bei allen Fahrzeugen der lauteste Schallpegel an Messpunkt 4 im Heck des Fahrzeugs gemessen. Hier lagen die Messwerte bei den Hybridbussen zwischen 69,1 und 73,7 db(A). Die Dieselsebusse erreichten 73,1 bis 80,8 db(A). An der leisesten Messstelle, vorn am Mikrofon 8, lagen die Hybridwerte zwischen 49,9 und 62,2 db(A) während bei den Dieselsebusen 51,6 bis 62,7 db(A) gemessen wurden.

Abbildung 44 zeigt am Beispiel eines Hybridbusses die Verteilung der Rundumgeräuschpegel einer Messung. Auf Grund des symmetrisch angeordneten Auspuffaustrittes hinten, oben sind insbesondere die Werte an der Fahrzeugfront, die in einer Höhe von 1,2 m gemessen wurden als sehr gering anzusehen.

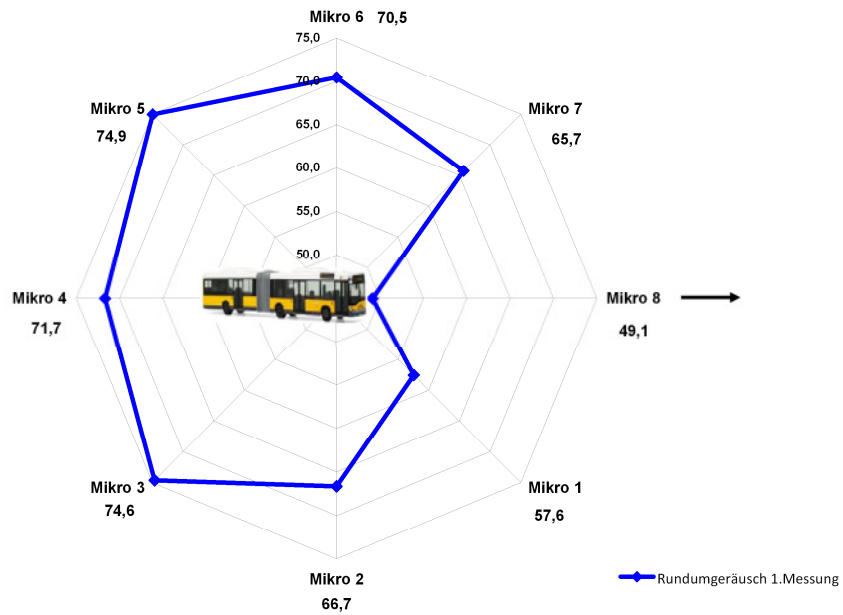


Abbildung 26: Verteilung der Rundumgeräusche bei einem Hybridbus

Ergebnisse der Haltestellen An- und Abfahrten

Die Abbildungen 45 und 46 zeigen den Verlauf der Schallpegelwerte eines Hybridbusses und dem dazugehörigen Referenzfahrzeug bei einer Haltestellen An- und Abfahrt. Die Anfahrtspegel zeigen im Bereich bis 300 ms keinen deutlichen Unterschied in ihren Maximalpegelwerten. Somit lässt sich für eine Haltestellenanfahrt des Hybridbusses gegenüber der Diesel-Referenz zunächst kein messbarer Vorteil erkennen. Während der Standzeit wurden Bremse und Türen betätigt. Die dadurch hervorgerufenen Druckluftgeräusche sind mit bis zu 70dB(A) erkennbar. Durch das elektrisch unterstützte Anfahren zeigt sich bei der Haltestellenabfahrt für das Hybridfahrzeug, insbesondere im hinteren Haltestellenbereich (Mikrofon 5-8; 1200-2000ms), mit ca. 68dB(A) ein deutlich erkennbarer, geringerer Schallpegelwert im Vergleich zum reinen dieselmotorischen Antrieb.

Für die Diesel-Referenz zeigen sich insgesamt höhere Schallpegelwerte in allen Octavbändern. Dies spiegelt auch der Pegelunterschied von 68 dB(A) zu 75 dB(A) im Abfahrtbereich wieder. Eine Gegenüberstellung der Frequenzen im Abfahrtsbereich (bei 1250 ms; Mikrofon 2) zeigt Abbildung 47. Der höhere Schallpegel der Diesel-Referenz 1 bei 63Hz weist auf einen höheren Anteil des Motorengeräusches hin.

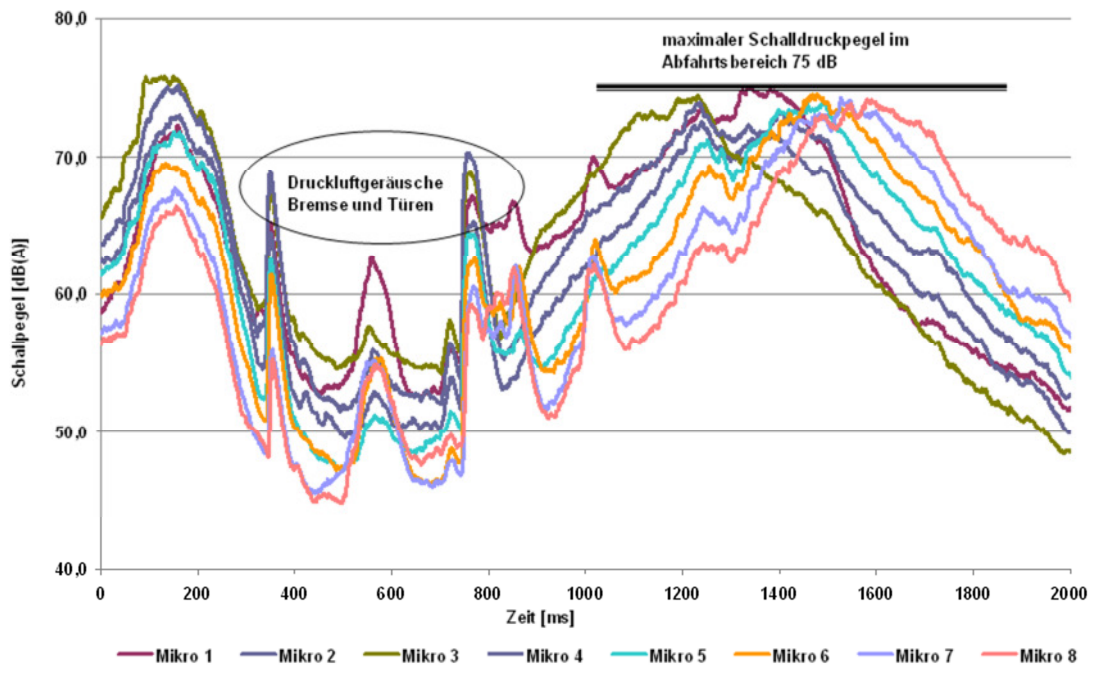


Abbildung 27: Pegelverlauf einer Haltestellen An- und Abfahrt (Diesel-Referenz)

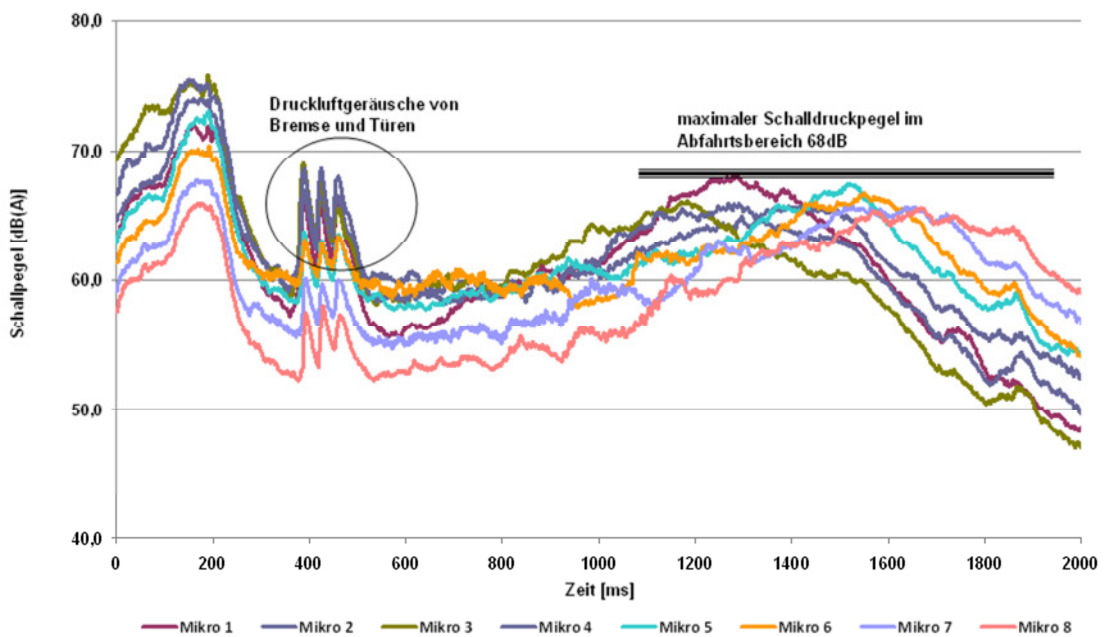


Abbildung 28: Pegelverlauf einer Haltestellen An- und Abfahrt (Hybridbus)

4.3.1.3 Vergleich der Außengeräuschemessungen

Neben der Forderung einer definierten Kraftstoffeinsparung war als weiteres Förderkriterium für die Hybridfahrzeuge die Einhaltung eines Geräuschemesswertes von 77 dB(A) für die betrachtete Fahrzeugkategorie bei einer Motorleistung > 150 kW gefordert. Der Vergleich der Ergebnisse zeigte, dass alle drei Hybridbusse dieses Kriterium erfüllen, zieht man als Grundlage den arithmetischen Mittelwert der Messverfahren A und B nach Anhang 3 bzw. Anhang 10 der ECE R.51 heran.

Die Rundum-Geräuschemessungen zeigen für alle Hybridfahrzeuge deutliche Vorteile im Vergleich zur Diesel-Referenz. Die Betrachtung der Haltestellen An- und Abfahrten zeigt ebenfalls, dass die Hybridfahrzeuge im An- und Abfahrbereich deutlich unter den geforderten 77 dB(A) und auch unterhalb der Ergebnisse für die Diesel-Referenz liegen.

4.3.2 Akustik Fahrgastraum

Im Rahmen des Arbeitspaketes 3 „Überprüfung der Geräuschemissionen“ erfolgt seitens des ika die Ausstattung der jeweiligen Fahrzeuge mit akustischer und schwingungstechnischer Messtechnik für die Zwecke der Fahrgastraumgeräuschemessungen.

Zum Einsatz kommen dabei ein spezielles Kunstkopfmesssystem für eine gehörrichtige, binaurale Aufnahme sowie Mikrofonmesstechnik an verschiedenen Messpositionen im Fahrgastraum. Parallel dazu erfolgt die Akquisition von vibroakustischen Referenzdaten (Körperschallstrukturschwingungen) an komfortrelevanten Positionen (Fußraum, Sitz und Haltestangen). Mit Hilfe dieser Messungen werden die wesentlichen akustischen und schwingungstechnischen Charakteristika im Innenraum erfasst und durch die Analysen fahrzeugspezifisch bewertet. Der Schwerpunkt liegt dabei auf der Fahrgastraumgeräuschcharakterisierung des jeweiligen Fahrzeugtyps. Die Versuchskampagnen beinhalten Messungen im Linienbetrieb als auch definierte Fahrmanöver auf gesonderten Streckenabschnitten (z.B. Vollastbeschleunigungen 0 km/h auf 80 km/h).

Basierend auf den Außengeräuschemissionsmessungen des Projektpartners TÜV Nord und den Fahrgastraumgeräusch- und Schwingungsmessungen des ika wurden im Rahmen des Teilaufgabenpaketes „Beratung bei den Geräuschemissionsmessungen“ die gewonnenen Erkenntnisse entsprechend korreliert, um das Akustik- und Schwingungsverhalten der verschiedenen Hybridfahrzeugtypen auf Gesamtfahrzeugebene bestmöglich bewerten zu können.

Grundvoraussetzung für die Messungen ist ein für alle Hybridlinienbustypen realisierbares, einheitliches Mess-Setup. Ziel hierbei war es, trotz der Verschiedenartigkeit der Fahrzeugtypen, die Ergebnisse der Fahrgastraumgeräuschemessungen bestmöglich vergleichen zu können.

Für diese Zwecke ist gleichfalls ein spezielles Messprogramm definiert worden, um bei allen Fahrzeugtypen entsprechend vereinheitlichte, reproduzierbare Eingangsmessungen zu generieren. Dieses Programm umfasst verschiedene spezifische Fahrmanöver, wie beispielsweise Beschleunigen unter Vollastbedingungen, reale Fahrmanöver aus dem Linienbetrieb zur Charakterisierung der Geräuschbelastung für

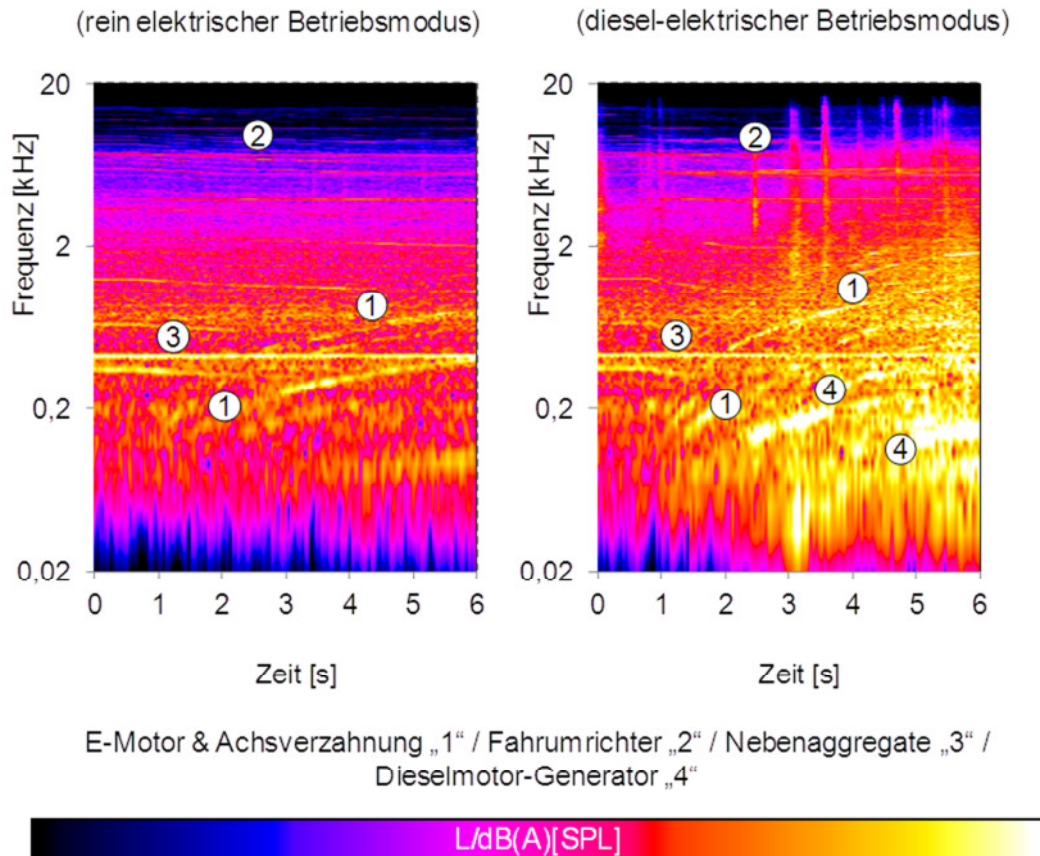


Abbildung 30: Frequenz-Spektrogramm bei Haltestellenabfahrt (Hybridbus)

Wie gleichfalls aus Abbildung 30 hervorgeht, prägen darüber hinaus der E-Motor und die Achsverzahnung der Elektromotor-Getriebe-Stufen („1“) sowie spezifische Nebenaggregate („3“) die Geräuschkulisse. Auch werden durch die Fahrumrichter / Leistungselektronik („2“) hochfrequente Geräuschanteile im Fahrgastraum induziert. Insbesondere im rein elektrischen Betriebsmodus (bei fehlender akustischer Maskierung des Dieselmotor-Generators) können diese hybridspezifischen Geräuschphänomene von den Fahrgästen verstärkt wahrgenommen werden. Hieraus resultieren insgesamt gestiegene Anforderungen an die NVH-Entwicklung zukünftiger Fahrzeugkonzepte.

4.3.2.2 Geräuschverhalten Fahrgastraum

Die Ergebnisse der Geräuschmessungen im Fahrgastraum zeigen, dass durch die Elektrifizierung des Antriebstrangs bei diesel-elektrischen Hybridlinienbussen das Potential für verringerte Geräuschemissionen und demnach einer reduzierten Geräuschbelastung für die Fahrgäste existiert. Dies gilt insbesondere für die mögliche Option des rein elektrischen Fahrens bzw. einer kombinierten Betriebsweise im Linienbetrieb sowie beim praxisrelevanten Manöver Haltestellenabfahrt unter Vollastbedingungen.

Nichtsdestoweniger resultiert aus den Messungen auch, dass diese Potentiale noch nicht vollständig ausgeschöpft sind. Obwohl im Rahmen dieses Projektes keine Standard-Dieselbusse explizit im Fahrgastraum vermessen wurden, kann jedoch mit Bezug zu /14/ angeführt werden, dass die gemessenen Fahrgastraumgeräuschpegelwerte teilweise noch in der Streubandbreite von modernen Standard-Dieselbussen liegen.

Durch teilweise neuartige hybridspezifische Geräuschphänomene bei gleichzeitig fehlender, akustischer Maskierung im rein elektrischen Fahrbetrieb gelten nach dem aktuellen Technikstand der auch in diesem Projekt betrachteten Hybridlinienbusse gestiegene Anforderungen an die NVH-Gestaltung mit entsprechend neuartigen Herausforderungen an den Entwicklungsprozess zukünftiger Fahrzeugkonzepte.

4.4 Wissenschaftlicher Beirat bei den CO₂- und Abgasmessungen

Das Institut für Verbrennungskraftmaschinen und Thermodynamik der Technischen Universität Graz (TUG) war im Projektverlauf beratend eingebunden. Diskutiert wurden u.a. die Zyklusauswahl, die Messtechnik, die Problematik einer zu hohen Bremsenergieerückgewinnung und die Auswertungsmöglichkeiten bei nicht neutraler Batterieladung über den Testzyklus. Die diskutierten Lösungswege wurden sinnvoll umgesetzt und dürften zu einer sehr aussagekräftigen Messreihe geführt haben.

Sämtliche im Bericht dargelegten Methoden entsprechen dem derzeitigen Stand der Technik und dem bei Rollenmessungen -speziell mit kurzer Verfügbarkeit der Testfahrzeuge- möglichen Umfang. Wie auch im Bericht dargelegt, wurde in den Jahren 2010 und 2011 international mehr Aufmerksamkeit auf die Messung des Verbrauchs und der CO₂-Emissionen von Nutzfahrzeugen gelegt, so dass auch die Mess- und Auswertemethoden verfeinert werden konnten. Die Rollenmessungen entsprechen noch immer dem Stand des Wissens, die durchgeführten Ausrollversuche entsprechen für vergleichende Zwecke ebenfalls auch zum Projektende hin dem Stand der Technik.

Die getroffenen Schlussfolgerungen sind logisch und der daraus erstellte Bericht stellt sicher eine sehr nützliche Informationsquelle für Busbetreiber dar. Die Aussagen sind natürlich nur unter Beachtung der Testbedingungen gültig. Eine Bestätigung im echten Linienbetrieb kann hoffentlich später durch Vergleiche der Tankdaten der Verkehrsbetriebe ermittelt werden, wenn Hybridbusse und konventionelle Busse auf denselben Linien betrieben werden. Interessante Randbedingungen, die im Testprogramm naturgemäß nicht abgebildet werden konnten, sind z.B.:

Steigungen und Gefälle im realen Betrieb, die den Ladezustand der Batterie und damit die rekuperierbare Energie positiv und negativ beeinflussen können.

Die vom Hersteller gewählten Getriebesteuerprogramme, die den Verbrauch bei konventionellen und bei Hybridbussen erheblich beeinflussen können, können auf Kundenwunsch angepasst werden. Inwieweit damit Verschiebungen zwischen den Referenzbussen und den Hybridbussen bezüglich Verbrauch auftreten, ist derzeit unbekannt.

Das Fahrerverhalten kann bei Bussen den Verbrauch im realen Betrieb erheblich beeinflussen. Auf der Rolle folgen alle Busse demselben Zyklus. Inwieweit Hybridbusse bzw. generell Busse mit verschiedenem Leistungsgewicht im realen Betrieb anders gefahren werden als konventionellen Busse ist derzeit nicht bekannt.

Die Ergebnisse zu den Schadstoffemissionen sind für Dieselmotoren mit Euro V Typisierung im Betrieb in Stadtzyklen typisch. Hier werden häufig für eine befriedigende NO_x-Konvertierung zu geringe SCR-Temperaturen festgestellt. Dieses Problem ist somit, wie im Bericht beschrieben, nicht hybrid-typisch. Die Hybridisierung ermöglicht

sogar eine effizientere thermische Optimierung des SCR-Systems, da kühlendes Leerlaufabgas durch Start-Stop vermieden werden und bei Bedarf durch Lastanhebung am Verbrennungsmotor zum Generieren von elektrischer Energie auch die Abgastemperatur erhöht werden kann. Allerdings steht die Entwicklung dazu bei Nutzfahrzeugen noch relativ am Anfang und die hier vermessenen Hybridbusse, deren Entwicklung ja schon vor längerer Zeit abgeschlossen war, nutzen diese Optionen mit ihren SCR-Systemen scheinbar noch nicht oder nur gering. Zukünftige Hybridbusse könnten also noch weitere Vorteile nutzen. Inwieweit die im Bericht dargestellten Kostennachteile damit gemindert werden können, wird auch von den produzierten Stückzahlen abhängen.

5 Betriebswirtschaftlich-technische Untersuchungen

Der betriebswirtschaftlich-technische Teil des Begleitprogramms ist in vier Arbeitspakete (im folgenden AP genannt) aufgeteilt, die durch die verschiedenen Projektpartner teils gemeinsam, teils in Zusammenarbeit unter Federführung eines Projektpartners bearbeitet werden. Tabelle 10 gibt einen Überblick über die Projektstruktur und die an den Arbeitspaketen (AP) jeweils beteiligten Kooperationspartner:

Tabelle 10: Aufgabenteilung der Arbeitspakete

Arbeitsschritte		Aufgabenteilung		
		PE	BbA	VCDB
Arbeitspaket 1		Ermittlung der Kosten im Linienbetrieb Federführung: BbA		
1.1	Datenübernahme	--	Übernahme der notwendigen Daten aus AP2 für alle 50 Hybridbusse und die jeweiligen Diesel-Referenzbusse inkl. Konsistenzprüfung und Klärung offener Fragen	--
1.2	Anpassung Kalkulationsmodell	--	Ermittlung/Analyse der fahrzeugbezogenen Kosten für alle Fahrzeugtypen, Betreiber und Einsatzbedingungen	Ermittlung/Analyse der systembezogenen Kosten für alle Fahrzeugtypen, Betreiber und Einsatzbedingungen
Arbeitspaket 2		Bewertung der Inbetriebnahme und des Linienbetriebs Federführung: PE		
2.1	Datenerhebung und Evaluierung der technischen Eigenschaften	<ul style="list-style-type: none"> • SoFi Datenerfassung für Lübeck, Hannover, Dresden, Leipzig • SoFi Auswertung alle Standorte • Erfassung Technische Zuverlässigkeit Lübeck, Hannover 	--	<ul style="list-style-type: none"> • SoFi Datenerfassung für 8 VU in Sachsen ohne DVB und LVB • Erfassung Technische Zuverlässigkeit Sachsen
2.2	Infrastruktur u. Ersatzteile	--	--	Erfassung Ersatzteilbedarf bei Lieferanten und Verkehrsunternehmen
2.3	Erfahrungen Inbetriebnahme/ Linienbetrieb	<ul style="list-style-type: none"> • Erfassung Einsatzbedingungen Lübeck, Hannover • Befragung 6 Wochen nach Inbetriebnahme Hannover & Lübeck 	--	<ul style="list-style-type: none"> • Erfassung Einsatzbedingungen Sachsen • Befragung 6 Wochen nach Inbetriebnahme Sachsen • Befragung Akzeptanz Hannover und Lübeck
Arbeitspaket 3		Lösungsvorschläge und Optimierung Federführung: VCDB		
3.1	Erarbeitung von Vorschlägen zur Verbesserung des Hybridbus-einsatzes	Strategie zur Integration & Betrieb Hybridbusse	--	Strategie zu Integration & Betrieb Hybridbusse Erstellung Typberichte

3.2	Kostenentwicklungsszenarien	--	Analyse Kostenentwicklung für verschiedenen Einsatzrandbedingungen	Zulieferung Inhalte/Ergebnisse in Bezug auf systembedingte Zusatzkosten
3.3	Optimierung Energiemanagement	--	--	Optimierung Event Management HESS

Alle dem Projekt zugrunde liegenden Informationen und Daten stammen von verschiedenen involvierten Herstellern und den deutschen Betreibern der geförderten Hybridbusse.

Da für Arbeitspaket 1 Verbrauchsdaten der eingesetzten Hybridbusse genutzt werden, werden dieser Abfolge entsprechend zunächst die Ergebnisse des technischen Arbeitspaketes 2 „Bewertung der Inbetriebnahme und des Linienbetriebs“ vorgestellt. Darauf aufbauend werden im Kapitel 5.2 die Kosten des Linienbetriebs (AP 1) ermittelt. Arbeitspaket 3 führt die technischen Ergebnisse des Linieneinsatzes und die Kostenermittlung zusammen und erörtert verschiedene Lösungsansätze und Weiterentwicklungen, die im Laufe des Projektes identifiziert bzw. unternommen wurden.

5.1 Bewertung der Inbetriebnahme und des Linienbetriebs

Wie bereits eingangs erwähnt, werden zunächst die Daten und Ergebnisse der Inbetriebnahme und des Linienbetriebs vorgestellt. Darauf aufbauend werden in Kapitel 5.2 die Kosten ermittelt.

5.1.1 Zielsetzung und Vorgehensweise

Arbeitspaket 2 hat zum Ziel, die Inbetriebnahme der Hybridbusse sowie den Linienbetrieb zu untersuchen und quantitativ sowie qualitativ zu bewerten.

Diese Untersuchungen wurden mittels einer Betriebsdatenerfassung (Laufleistung, Einsatzzeit, Verbrauch, Verfügbarkeit etc.) sowie einer Akzeptanzuntersuchung der Technologie bei Fahrgästen und Busfahrern durchgeführt. Übergeordnetes Ziel ist es, die Praxistauglichkeit und die Akzeptanz der Technologie im Hinblick auf den gegenwärtigen Reifegrad zu bestimmen und zu bewerten.

Im Fokus der Untersuchungen stehen folgende Aspekte:

- Energieeffizienz und Klimaschutz
- Technische Zuverlässigkeit
- Praktische Einsatzerfahrungen
- Akzeptanz der neuen Technologie
- Qualifikationsanforderung an Wartungspersonal und Fahrer
- Erforderliche Infrastrukturanpassungen

Einen Überblick über das methodische Vorgehen gibt die nachfolgende Abbildung 31:

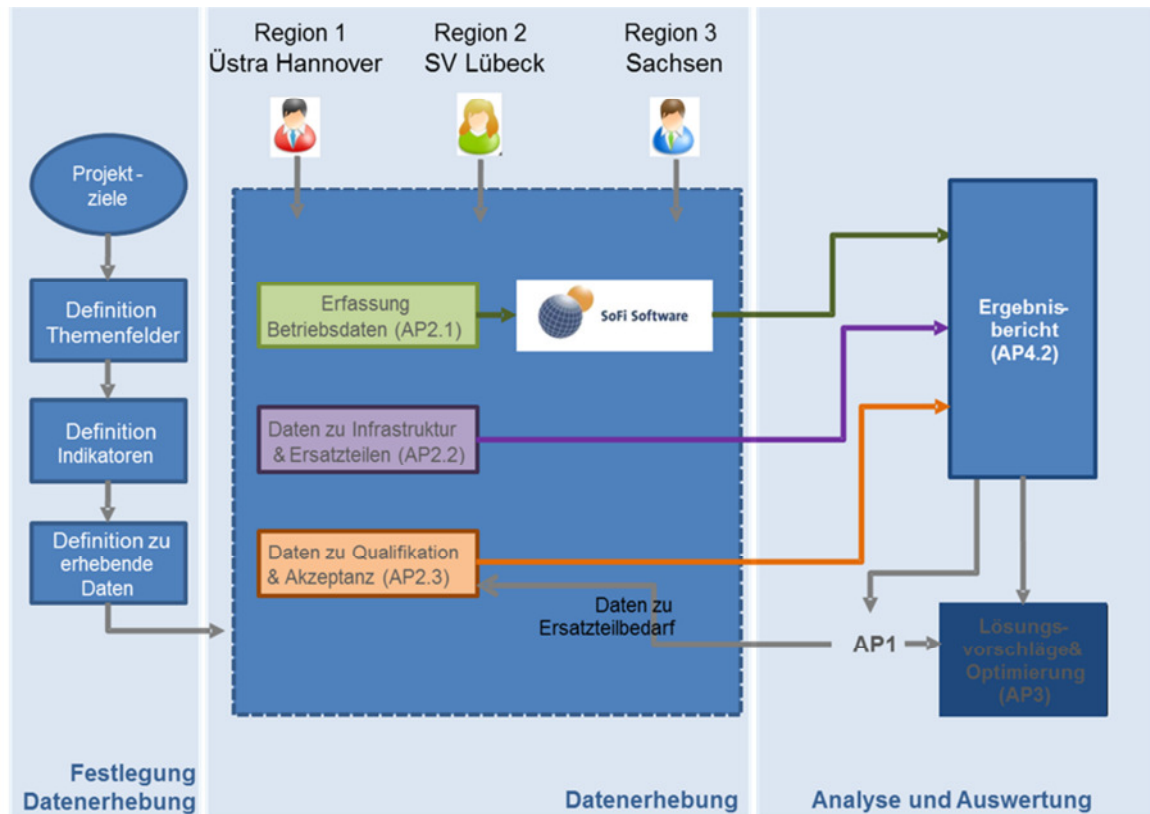


Abbildung 31: Überblick Ansatz und Ablauf AP 2

Entsprechend der dargestellten Vorgehensweise wurden aus den übergeordneten Programm- bzw. Projektzielen zunächst die zu betrachtenden Themenfelder abgeleitet. So wurden für die hier definierten Themenfelder Praxistauglichkeit und Einsatzreife, Effizienz, Ökologie und Klimaschutz, Akzeptanz und Qualifikation spezifische Indikatoren bzw. Kriterien festgelegt, die eine qualitative und/oder quantitative Bewertung der Hybridantriebstechnologie ermöglichen.

Die Festlegung der Themenfelder und Kriterien erfolgte weitestgehend durch den Auftraggeber im Rahmen der Ausschreibung der Begleitforschung.



Abbildung 32: *Bewertungskriterien und Themenfelder*

Aus den definierten Kriterien ergab sich der Bedarf an Daten, die erhoben werden mussten. Die Erhebung der Daten geschah arbeitspaketübergreifend, wie in Abbildung 31 dargestellt. So wurden beispielsweise für AP 2 die Verbrauchsdaten im Linieneinsatz erfasst und für AP 1 bestimmte systembedingte Zusatzkosten (z.B. für Personalschulung etc.) erhoben.

Die Evaluierung der Betriebserfahrungen fand bei den teilnehmenden Verkehrsbetrieben bzw. Regionen (RegioHybrid Sachsen) statt und umfasste sowohl die Erfassung der Betriebsdaten, die mit Hilfe der SoFi-Software (AP2.1) erhoben und zentral aufbereitet wurden, als auch Befragungen zu Qualifikation und Akzeptanz sowie zu Infrastruktur und Ersatzteilen. Auf Grund der hohen Menge an Betriebsdaten pro Verkehrsbetrieb bzw. Region wurde auch eine CSV-Datei eingesetzt, um die Sammlung von Betriebsdaten zu vereinfachen und in SoFi zu importieren.

Die Daten zur Akzeptanz der Technologie wurden mittels quantitativer Umfragen und teilstrukturierter Interviews erfasst (AP 2.3). Für den Ersatzteilbedarf erfolgte die Datenerfassung im Rahmen des AP 1.

Die erhobenen Daten wurden analysiert und dienen als Grundlage für vorliegenden Abschlussbericht.

5.1.2 Ergebnisse der Evaluierung der technischen Eigenschaften

Die Arbeitsinhalte des Arbeitspaketes waren vor allem auf folgende Themen fokussiert:

- Bewertung der technischen Zuverlässigkeit der Hybridbusse (Laufleistung der Busse; Art, Häufigkeit und Dauer der Ausfälle etc.)
- Beurteilung der Einsatzreife von Hybridbussen für den Linienbetrieb und Dokumentation der Unterschiede zu herkömmlichen Dieselnissen

Die Unternehmen der ARGE RegioHybrid wurden im Vorfeld des Hybridbuseinsatzes bezüglich der Auswahl geeigneter Linien beraten. Hierfür wurden die jeweiligen Linien zusammengestellt und nach Reisegeschwindigkeit, Höhenprofil und Fahrzeugtyp analysiert.

Um einen objektiven und einsatzspezifischen Vergleich vornehmen zu können, wurden Fahrzeuggruppen zusammengestellt, die aus mindestens einem Hybridbus und einem möglichst baulich vergleichbaren Dieselreferenzbus bestanden. Es erfolgte eine Beratung der Unternehmen bei der Auswahl der Referenzfahrzeuge.

Die Datenerfassung erfolgte, wie oben beschrieben, mit Hilfe der SoFi-Software bzw. durch Zuhilfenahme einer CSV-Datei. Aufbau und Funktionsweise von SoFi sind in nachfolgender Abbildung dargestellt (siehe Abbildung 33). Mit der SoFi-Software ist es möglich, den täglichen Fahrzeugbetrieb effektiv zu erfassen bzw. auszuwerten und Benchmark-Vergleiche zwischen verschiedenen Einsatzgebieten durchzuführen. Die Software wurde bereits erfolgreich in anderen Busdemonstrationsprojekten eingesetzt, wie z. B. in der Busplattform des BMVBS oder in von der EU geförderten Projekten zu Wasserstoffbussen (CHIC, HyFLEET:CUTE, CUTE).

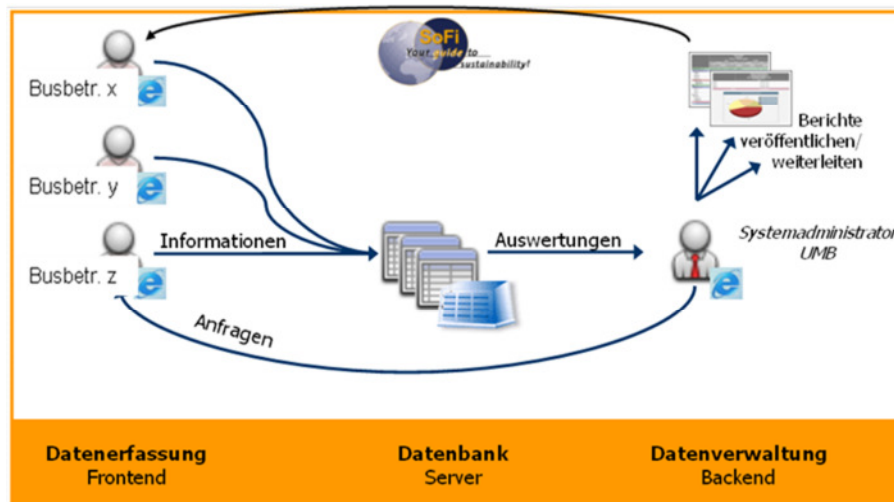


Abbildung 33: Aufbau und Funktionsweise der SoFi Software

Die nachfolgende

Abbildung 34 präsentiert zum einen die Startfläche der web-basierten SoFi-Software und zum anderen die beispielhafte Datenerfassung der Betriebsdaten eines Busses. Neben der Erfassung der Betriebsdaten wurden im Rahmen des Projektes mit Hilfe der SoFi auch Datenauswertungen und Analysen durchgeführt.

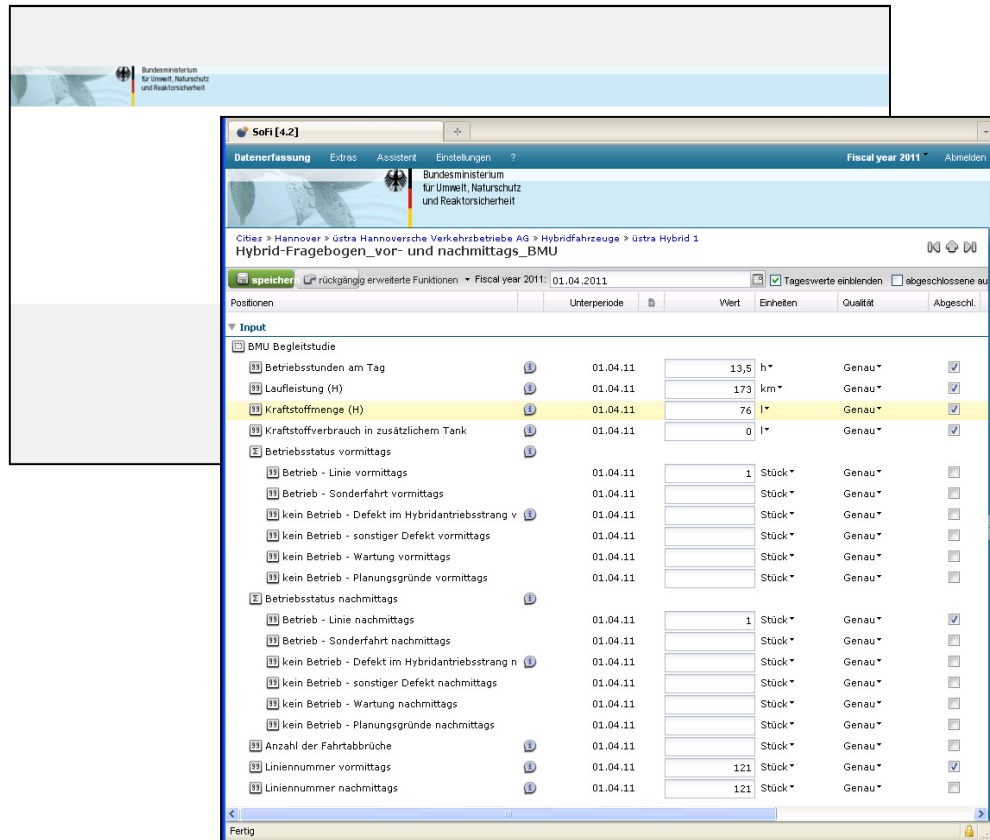


Abbildung 34: SoFi - Anwendung zur Datenerfassung

Die Datenerfassung wurde entsprechend der definierten Kriterien implementiert. Es wurden sowohl Daten für den Vormittagsbetrieb als auch für den Nachmittagsbetrieb aufgenommen. Die einzeln zu erfassenden Daten wurden thematisch geordnet und in sogenannten Fragebögen erfasst, die sich wie oben dargestellt nach Themen gliedern. Das integrierte Workflow-Management ermöglichte eine effiziente Dateneingabe. Über die Nutzer- und Rechteverwaltung wurde sichergestellt, dass jeder Nutzer nur die für ihn relevanten Daten einsehen und eingeben konnte und keinen unbefugten Zugriff auf die Daten der anderen Betreiber hatte.

Folgende Daten wurden täglich in SoFi für die Hybridbusse sowie die konventionellen Dieselreferenzbusse erfasst:

- Laufleistung
- Betriebsstunden
- Betriebsstatus (zur Betrachtung von Ausfallzeiten)
- Havariedaten (Standzeit und Instandsetzung durch Betreiber oder Hersteller)

Darüber hinaus wurde auch der Kraftstoffverbrauch während des Praxisbetriebs ermittelt. Hierzu wurden Tankmenge und dazugehöriger Kilometerstand sowie Liniennummer erfasst. Eine linienreine Bewertung der Daten ist jedoch nur unter der Voraussetzung eines „linienreinen“ Einsatzes der Hybridfahrzeuge sowie der Referenzfahrzeuge zwischen zwei Betankungsvorgängen möglich. Dies wurde von den Busbetreibern – sofern möglich – in der Einsatzplanung berücksichtigt.

Für die Verkehrsunternehmen der ARGE RegioHybrid erfolgte die Datenerfassung zentral durch das Fraunhofer IVI. Damit verbunden war eine Prüfung der Fahrzeugunterlagen, um nicht verwertbare Messungen bzw. Tank- und Laufleistungsdaten zu eliminieren. Zusätzlich erfolgte eine Beschreibung der betrachteten Linien hinsichtlich Durchschnittsgeschwindigkeit, Anzahl der Haltestellen pro Kilometer und Höhenprofil.

Auswertungen der Betriebsdaten mit SoFi

Mithilfe des SoFi-Softwaretools konnte zu jedem Zeitpunkt des Projektverlaufs eine Auswertung der zu diesem Zeitpunkt erzielten Ergebnisse und Leistungen der Flotten- und Fahrzeugdaten abgerufen werden.

Für das Projekt wurden spezifische Berichtsvorlagen erstellt, die es den Verantwortlichen bei den Busbetreibern, aber auch dem Fördermittelgeber ermöglichten, Online-Auswertungen der erfassten Daten für die Einzelfahrzeuge oder die Flotte täglich, monatlich und quartalsweise zu betrachten.

Folgende Berichte konnten in SoFi eingesehen werden:

- Laufleistung der einzelnen Fahrzeuge, pro Tag und kumuliert
- Durchschnittliche Laufleistung pro Flotte (pro Tag und kumuliert)
- Betriebsdauer der einzelnen Fahrzeuge, pro Tag
- Monatliche Betriebsdauer pro Flotte
- Durchschnittlicher Kraftstoffverbrauch, je Bus
- Durchschnittliche Verfügbarkeit pro Fahrzeug bzw Flotte je Monat und Jahr
- Verteilung des Betriebsstatus nach Kategorien (pro Bus und pro Flotte)

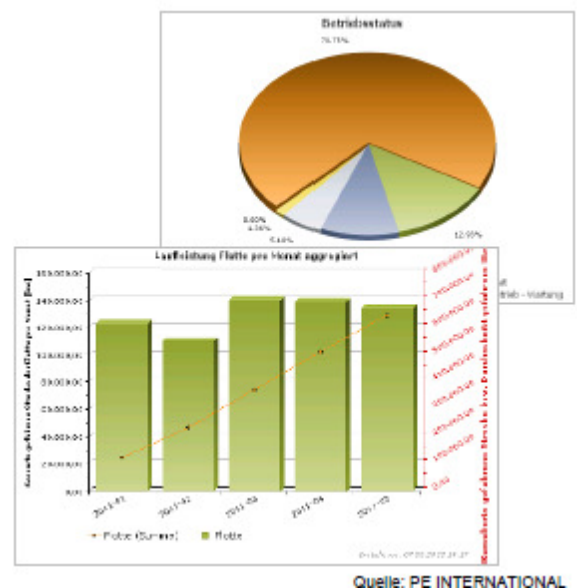


Abbildung 35: *Beispiel Bericht Betriebsdaten in SoFi*

Datenerfassung

Eine umfangreiche Einweisung in die Datenerfassung und die Handhabung der CSV-Datei fand in allen teilnehmenden Regionen statt. Die Einweisung umfasste zum einen eine Erklärung der Datenerfassung und zum anderen eine Einführung in das SoFi-Softwaretool. SoFi kann von allen Datenerfassern genutzt werden, um Auswertungen der eigenen Daten vorzunehmen. Um dieses Werkzeug nutzen zu können, fand auch eine diesbezügliche technische Einweisung in SoFi statt, teilweise bei den Verkehrsbetrieben vor Ort. Zusätzlich wurden den Teilnehmern ein SoFi-Benutzerhandbuch sowie die Erläuterung zur Datenerhebung per CSV als Dokumente zur Verfügung gestellt.

Die nachfolgenden Ergebnisse der Betriebsdatenanalyse umfassen entsprechend der Datenlage Auswertungen der ersten Betriebsmonate von allen 12 Verkehrsbetrieben.

Es ist zu berücksichtigen, dass der Zeitraum, für den die Basisdaten erfasst werden konnten, von Standort zu Standort teilweise stark variiert. Die Bandbreite beträgt 2 bis 8 Monate, im Schnitt waren je Fahrzeug Daten für knapp 5 Monate verfügbar, was auch der Einsatzdauer der Hybridbusse entspricht (siehe

Tabelle 11). Die teilweise sehr kurze Einsatzdauer an einigen Standorten liegt im verzögerten Lieferzeitpunkt der Hybridbusse begründet. Am Standort Dresden konnte noch keine Datenerfassung für die MAN-Fahrzeuge durchgeführt werden, da der Linieneinsatz erst im Laufe des Februars begonnen hat. Zur Erweiterung der Datenbasis wurden in Dresden acht Hybrid-Gelenkbusse in die Datenerfassung eingeschlossen, die im Rahmen der Förderung der Modellregionen Elektromobilität im Jahr 2011 beschafft wurden.

Tabelle 11: Überblick Datenverfügbarkeit Lübeck und Hannover

Verkehrsbetrieb (Anzahl Hybridbusse)	Fahrzeuge	Jun 11	Jul 11	Aug 11	Sep 11	Okt 11	Nov 11	Dez 11	Jan 12	Feb 12	Mrz 12
Stadtverkehr Lübeck GmbH (10)	MAN Solo: HL-SL 1695				x	x	x	x	x	x	x
	MAN Solo: HL-SL 1696			x	x	x	x	x	x	x	x
	MAN Solo: HL-SL 1697				x	x	x	x	x	x	x
	MAN Solo: HL-SL 1698					x	x	x	x	x	x
	MAN Solo: HL-SL 1699					x	x	x	x	x	x
	Solo Referenzfahrzeug: HL-SL-1617				x	x	x	x	x	x	x
	Solo Referenzfahrzeug: HL-SL-1618				x		x	x	x	x	x
	Solo Referenzfahrzeug: HL-SL-1619				x		x	x	x	x	x
	Solo Referenzfahrzeug: HL-SL-1620				x		x	x	x	x	x
	Hess Gelenk: HL-SL-1495			x	x	x	x	x	x	x	x
	Hess Gelenk: HL-SL-1496			x	x	x	x	x	x	x	x
	Hess Gelenk: HL-SL-1497			x	x	x	x	x	x	x	x
	Hess Gelenk: HL-SL-1498				x	x	x	x	x	x	x
	Hess Gelenk: HL-SL-1499				x	x	x	x	x	x	x
	Gelenk Referenzfahrzeuge: HL-SL-1425						x	x	x	x	x
	Gelenk Referenzfahrzeuge: HL-SL-1426				x	x	x	x	x	x	x
Gelenk Referenzfahrzeuge: HL-SL-1427				x		x	x	x	x	x	
Gelenk Referenzfahrzeuge: HL-SL-1428				x		x	x	x	x	x	
üstra Hannoversche Verkehrsbetriebe AG (10)	Solaris Gelenk: H-BF-301				x	x	x	x	x	x	x
	Solaris Gelenk: H-BF-302				x	x	x	x	x	x	x
	Solaris Gelenk: H-BF-303				x	x	x	x	x	x	x
	Solaris Gelenk: H-BF-304				x	x	x	x	x	x	x
	Solaris Gelenk: H-BF-305				x	x	x	x	x	x	x
	Solaris Gelenk: H-BF-306				x	x	x	x	x	x	x
	Solaris Gelenk: H-BF-307				x	x	x	x	x	x	x
	Solaris Gelenk: H-BF-308				x	x	x	x	x	x	x
	Solaris Gelenk: H-BF-309				x	x	x	x	x	x	x
	Solaris Gelenk: H-BF-310				x	x	x	x	x	x	x
Gelenk Referenzfahrzeug: H-BF 431				x	x	x	x	x	x	x	

Tabelle 12: Überblick Datenverfügbarkeit RegioHybrid

Leipziger Verkehrsbetriebe GmbH (LVB) (3)	Hess Gelenk: L-NV-1208				x	x	x	x	x	x	
	Hess Gelenk: L-NV-1209				x	x	x	x	x	x	
	Hess Gelenk: L-NV-1210				x	x	x	x	x	x	
	Gelenk Referenzfahrzeug: L-NV-2007				x	x	x	x	x	x	
LeoBus GmbH (5)	MAN Solo: L-VR-5151							x	x	x	
	MAN Solo: L-VR-5152							x	x	x	
	MAN Solo: L-VR-5153							x	x	x	
	MAN Solo: L-VR-5154							x	x	x	
	MAN Solo: L-VR-5155							x	x	x	
	Solo Referenzfahrzeug: L-NV-1122							x	x	x	
	Solo Referenzfahrzeug: L-NV-1127							x	x	x	
Regionalverkehr Dresden (RVD) (2)	MAN Solo: DD-RV 6601					x	x	x	x	x	x
	MAN Solo: DD-RV 6602					x	x	x	x	x	x
	Solo Referenzfahrzeug: DD-RV-6116					x	x	x	x	x	x
	Solo Referenzfahrzeug: DD-RV-6117					x	x	x	x	x	x
Verkehrsbetriebe Freiberg GmbH (4)	MAN Solo: FG-RM 676								x	x	x
	MAN Solo: FG-RM 677								x	x	x
	MAN Solo: FG-RM 678								x	x	x
	MAN Solo: FG-RM 679								x	x	x
	Solo Referenzfahrzeug: FG-VB-129					x	x	x	x	x	x
	Solo Referenzfahrzeug: FG-VB-248					x	x	x	x	x	x
	Solo Referenzfahrzeug: FG-VB-252					x	x	x	x	x	x
Solo Referenzfahrzeug: FG-VB-254					x	x	x	x	x	x	
Verkehrsgesellschaft Döbeln mbH (3)	MAN Solo: FG-RM-673						x	x	x	x	x
	MAN Solo: FG-RM-674								x	x	x
	MAN Solo: FG-RM-675								x	x	x
	Solo Referenzfahrzeug: DL-VD 76						x	x	x	x	x
	Solo Referenzfahrzeug: DL-VD 77						x	x	x	x	x
Solo Referenzfahrzeug: DL-VD 78							x	x	x	x	
Regiobus Mittelsachsen GmbH (3)	MAN Solo: FG-RM-670				x	x	x	x	x	x	x
	MAN Solo: FG-RM-671								x	x	x
	MAN Solo: FG-RM-672								x	x	x
	Solo Referenzfahrzeug: MW-R-191					x	x	x	x	x	x
	Solo Referenzfahrzeug: MW-R-194					x	x	x	x	x	x
	Solo Referenzfahrzeug: MW-R-197					x	x	x	x	x	x
Solo Referenzfahrzeug: MW-R-198					x	x	x	x	x	x	
Satra Eberhardt GmbH (1)	MAN Solo: PIR-ST-157								x	x	x
	Solo Referenzfahrzeug: DW-ST-113								x	x	x
	Solo Referenzfahrzeug: DW-ST-115								x	x	x
Dresdner Verkehrsbetriebe (DVB) AG (16)	MAN Solo										
	MAN Solo										
	MAN Solo										
	Solo Referenzfahrzeug										
	Hess Gelenk: DD-VB-4612		x	x	x	x	x	x	x	x	
	Hess Gelenk: DD-VB-4613		x	x	x	x	x	x	x	x	
	Hess Gelenk: DD-VB-4614		x	x	x	x	x	x	x	x	
	Hess Gelenk: DD-VB-4615		x	x	x	x	x	x	x	x	
	Hess Gelenk: DD-VB-4616		x	x	x	x	x	x	x	x	
	Evobus Gelenk: DD-VB-6201						x	x	x	x	
	Evobus Gelenk: DD-VB-6202						x	x	x	x	
	Evobus Gelenk: DD-VB-6203						x	x	x	x	
	Evobus Gelenk: DD-VB-6204						x	x	x	x	
	Evobus Gelenk: DD-VB-6205						x	x	x	x	
	Evobus Gelenk: DD-VB-6206						x	x	x	x	
Evobus Gelenk: DD-VB-6207						x	x	x	x		
Evobus Gelenk: DD-VB-6208						x	x	x	x		
Gelenk Referenzfahrzeug: DD-VB-1319		x	x	x	x	x	x	x	x	x	
Verkehrsgesellschaft Meißen mbH (2)	MAN Solo: MEI-NV 300								x	x	x
	MAN Solo: MEI-NV 400								x	x	x
	Solo Referenzfahrzeug: MEI-NV-107						x	x	x	x	x
	Solo Referenzfahrzeug: MEI-NV-109					x	x	x			
	Solo Referenzfahrzeug: MEI-NV-178					x	x	x	x	x	x
Müller Busreisen (1)	MAN Solo: PIR-MB 916								x	x	x
	Solo Referenzfahrzeug: PIR-MB-149								x	x	x
	Solo Referenzfahrzeug: PIR-PW-15								x	x	x

Die Datenauswertung erfolgte thematisch nach dem in Abbildung 36 dargestellten Auswertungsschema. In Kapitel 5.1.2.1 werden die Ergebnisse zu Praxistauglichkeit

und Einsatzreife dargestellt, Kapitel 5.1.2.2 umfasst Ergebnisse zu Effizienz und Kraftstoffverbrauch im Vergleich zu den Referenzfahrzeugen und in Kapitel 5.1.2.3 werden die Umwelteinflüsse und ökologischen Vorteile des Hybridbuseinsatzes veranschaulicht.

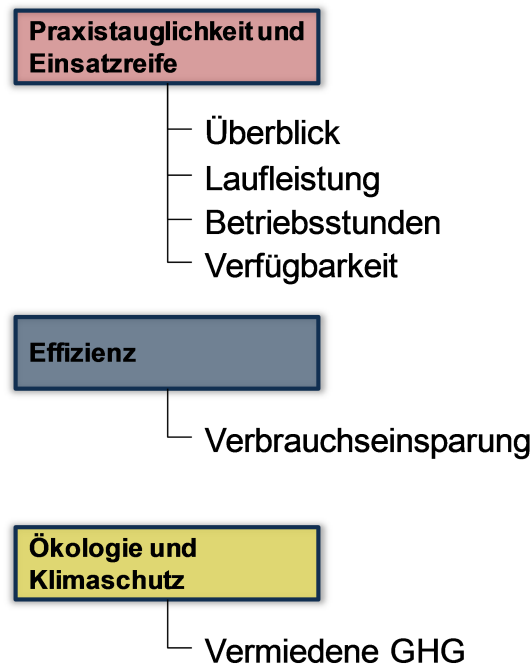


Abbildung 36: Auswertungsschema für das Arbeitspaket 2 (Auszug)

5.1.2.1 Praxistauglichkeit und Einsatzreife/ Technische Zuverlässigkeit

Die Praxistauglichkeit und Einsatzreife der Hybridtechnologie wird zum einen über die Erfassung der täglichen Laufleistung und der entsprechenden Betriebsstunden analysiert und zum anderen durch die tatsächliche tägliche Verfügbarkeit bzw. die Ausfallquote.

Weitere Grundlage der Untersuchungen zum Betrieb der Hybridbusse ist der direkte Vergleich zwischen den Betriebsdaten des Hybridbusses und den Daten der parallel erfassten konventionellen Dieselreferenzbusse. Um einen aussagekräftigen Vergleich, vor allem hinsichtlich des Kraftstoffverbrauchs (siehe Kapitel 5.1.2.2), zu ermöglichen, wurde das linienreine Fahren der Hybridbusse und der vergleichbaren Referenzbusse angestrebt, das aufgrund betrieblicher Gegebenheiten nicht immer möglich war. Es wurde außerdem grundsätzlich darauf geachtet, angemessene Referenzfahrzeuge in die Analyse zu integrieren, stellenweise war dies jedoch auf Grund eines Mangels an Dieselfahrzeugen der letzten Generation nicht möglich.

Auf Basis der zum Zeitpunkt der Berichtslegung verfügbaren Daten ergeben sich die nachfolgend dargestellten Ergebnisse zu Laufleistung und Betriebsstunden der Hybridbusse über die gesamte Projektlaufzeit:

Insgesamt wurde in allen Regionen von den erfassten Hybridbussen vom Beginn des Linienbetriebs bis Mitte März 2012 eine Fahrleistung von über 1,2 Mio. km erbracht (siehe Tabelle 13 und Abbildung 37).

Tabelle 13: Laufleistung Hybridbusse über Projektlaufzeit

Standort (Anzahl Fahrzeuge)	Laufleistung Hybridbusse über Projektlaufzeit			
	Alle Werte in [km]			
	km gesamt	Anteil	Durchschnittl. Laufleistung/ Fahrzeug	Durchschnittl. monatl. Laufleistung/ Fahrzeug
SV Lübeck (10)	279.947	22,1%	27.995	444
üstra Hannover (10)	297.681	23,5%	29.768	496
LVB Leipzig (3)	70.136	5,5%	23.379	1.299
LeoBus (5)	53.220	4,2%	10.644	710
VB Freiberg (4)	26.962	2,1%	6.741	674
VG Döbeln (3)	21.685	1,7%	7.228	761
RB Mittelsachsen (3)	39.459	3,1%	13.153	974
Satra (1)	15.875	1,3%	15.875	5.292
DVB Dresden (13)	385.214	30,5%	29.632	403
VG Meißen (2)	21.138	1,7%	10.569	1.510
RV Dresden (2)	39.379	3,1%	19.690	1.790
Müller (1)	13.776	1,1%	13.776	3.061
Gesamt	1.264.472	100%	Ø 22.184	Ø 788

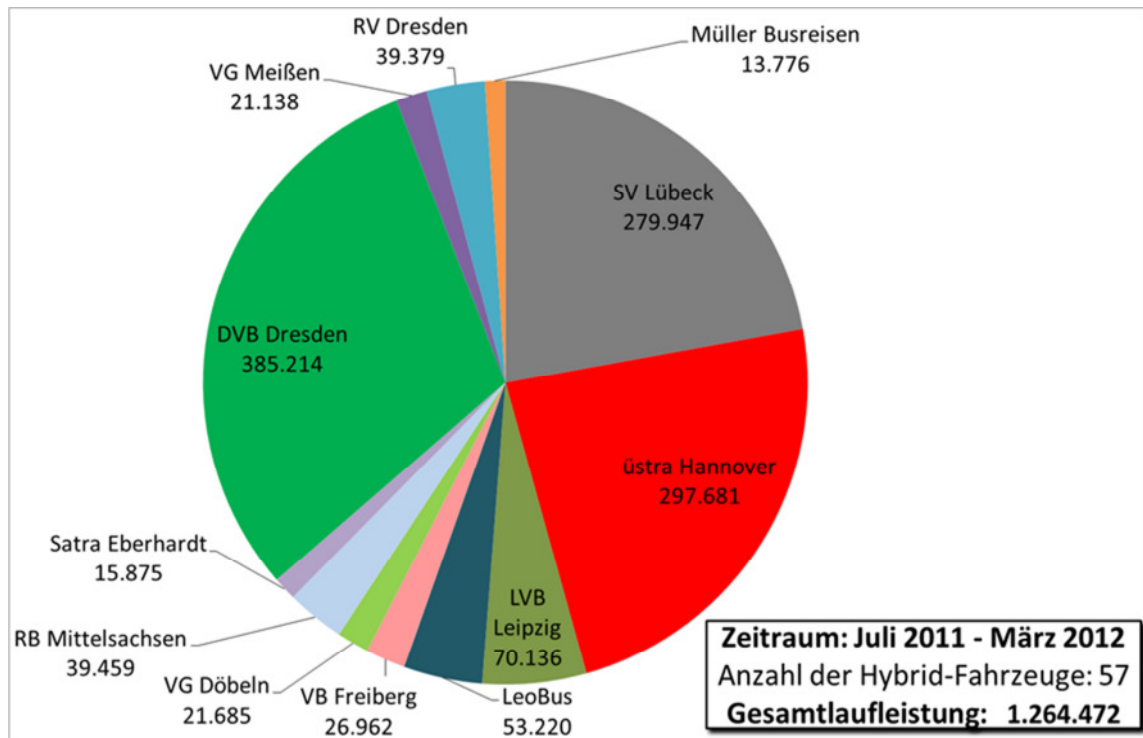


Abbildung 37: *Laufleistung Hybridbusse (in km)*

Im Durchschnitt hat jedes Fahrzeug im Erfassungszeitraum rund 22.183 km zurückgelegt. Zu beachten ist jedoch, dass nicht jedes Fahrzeug schon im Juli 2011 den Betrieb aufgenommen hat, sondern teilweise erst deutlich später ausgeliefert und in Betrieb genommen wurde und daher nicht alle die durchschnittlichen fünf Monate oder mehr in Betrieb war. Die beiden Hybridfahrzeuge der Verkehrsbetriebe Freiberg und auch zwei der drei Fahrzeuge der Verkehrsgesellschaft Döbeln beispielsweise sind zum Zeitpunkt des Berichtes noch keine 3 Monate im Einsatz.

Tabelle 14: Gesamte Betriebsdauer der Hybridbusse über Projektlaufzeit

Standort (Anzahl Fahrzeuge)	Betriebsstunden Hybridbusse über Projektlaufzeit			
	Alle Werte in [h]			
	Stunden gesamt	Anteil	Durchschnittl. Betriebsdauer/ Fahrzeug	Durchschnittl. monatl. Betriebsdauer/ Fahrzeug
SV Lübeck (10)	16.895	21,8%	1.689	27
üstra Hannover (10)	20.075	25,9%	2.008	33
LVB Leipzig (3)	4.125	5,3%	1.375	76
LeoBus (5)	4.067	5,3%	813	54
VB Freiberg (4)	1.900	2,5%	475	48
VG Döbeln (3)	1075	1,4%	358	38
RB Mittelsachsen (3)	1.895	2,4%	632	47
Satra (1)	975	1,3%	975	325
DVB Dresden (13)	22.093	28,6%	1.699	23
VG Meißen (2)	1.398	1,8%	699	100
RV Dresden (2)	2.283	3,0%	1.142	104
Müller (1)	581	0,8%	581	129
Gesamt	77.362	100%	Ø 1.357	Ø 47

Die gesamte Fahrleistung von über 1,2 Mio. km erfolgte über eine Betriebszeit von etwa 77.000 Stunden (siehe Abbildung 38 und Tabelle 14). Das entspricht einer durchschnittlichen Betriebsdauer von 1.357 h je Fahrzeug.

Die Unterschiede in der Betriebszeit der Hybridfahrzeuge je Standort liegen zum einen wiederum an der Inhomogenität der Einsatzdauer in Monaten und zum anderen an der Größe der Hybridbusflotte.

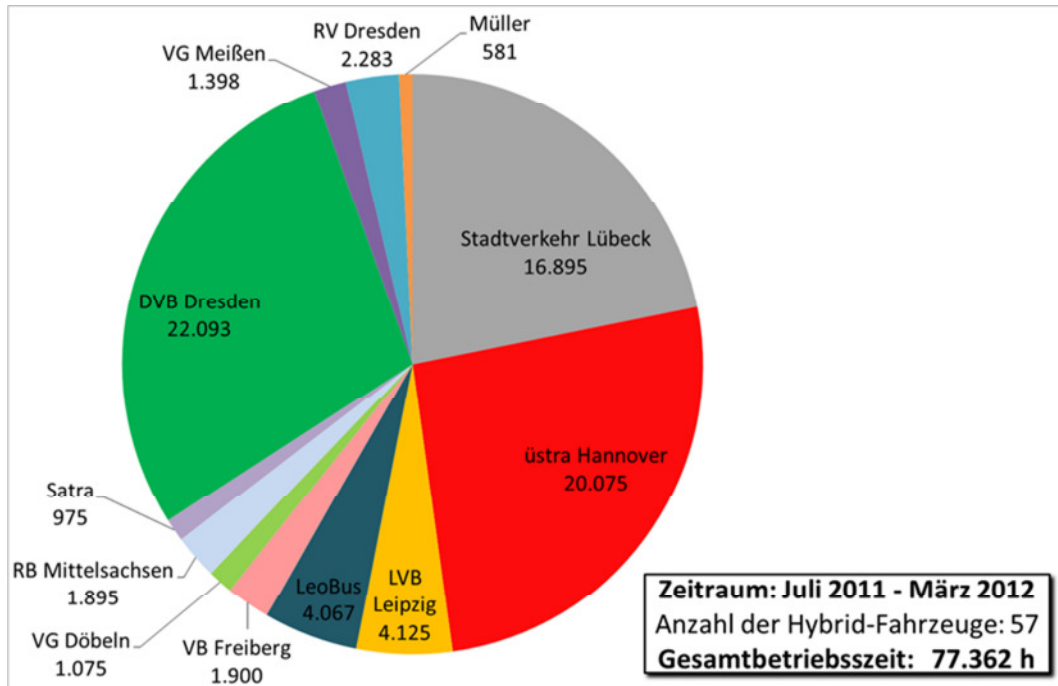


Abbildung 38: *Betriebsdauer der Hybridbusflotte (Angaben in h)*

Während beim Stadtverkehr Lübeck sowie bei der üstra Hannover je 10 Fahrzeuge im Einsatz sind, beschränken sich die Flotten der RV Dresden und Verkehrsgesellschaft Meißen beispielsweise auf je 2 Hybridbusse, die Einsatzzeit von 581 bzw. 1075 Stunden bei Müller Reisen und der Verkehrsgesellschaft Döbeln beschränken sich auf lediglich einen bzw. drei Solo-Hybridbusse und 4,5 Monate bzw. 2,5 Monate bisherige Einsatzdauer.

Auch die Höhe der Verfügbarkeit und die Einsatzplanung der Hybridbusse spielen hier eine Rolle. Nähere statistische Auswertungen zu den durchschnittlichen Betriebsstunden und Laufleistungen pro Tag werden im weiteren Verlauf dieses Kapitels erläutert.

Durchschnittliche tägliche Laufleistung und Betriebsstunden

Die Betriebsdaten zu täglicher Laufleistung und Betriebsstunden wurden statistisch ausgewertet. Im Nachfolgenden sind Histogramme der Laufleistung bzw. Betriebsstunden dargestellt sowie die entsprechende Verteilungsfunktion der Daten bis Mitte März (Abbildung 39).

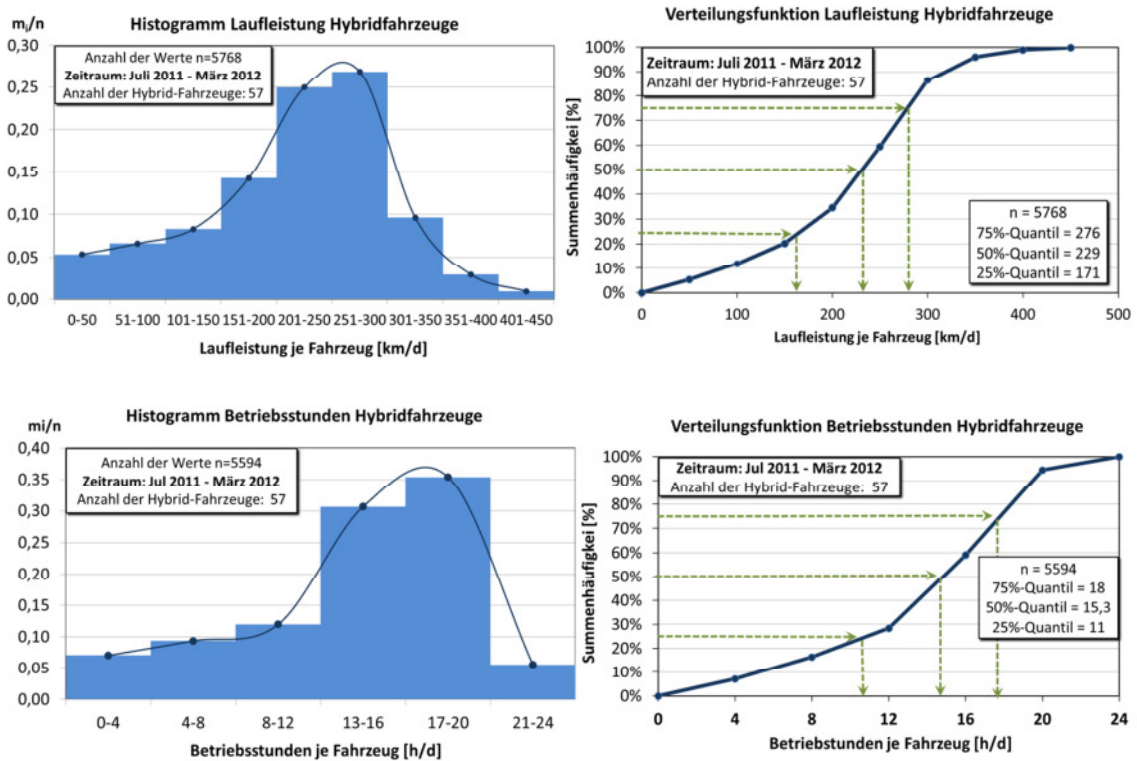


Abbildung 39: Statistische Auswertung von Laufleistung und Betriebsstunden

Rund zwei Drittel der rund 5.600 erfassten Tagesbetriebswerte lagen im Bereich 151-300 km Tageslaufleistung bzw. 13-20 h Betrieb pro Tag. Im Durchschnitt wurden täglich 229 km und 15,3 h Betrieb erzielt. Im Vergleich zu den Durchschnittswerten, die im Rahmen der vom BMVBS geförderten Modellregionen Elektromobilität für die dort eingesetzten 69 Hybridbusse ermittelten wurden, ergeben sich ähnliche Kennwerte (BMVBS: rund 200 km und 14 h Betrieb pro Bus und Tag)¹.

Durchschnittliche Verfügbarkeit

Nachfolgende Diagramme zeigen die Entwicklung der durchschnittlichen Verfügbarkeit der Hybridfahrzeuge in den ersten Betriebsmonaten. Die Darstellung zeigt sowohl die Verfügbarkeit der Betreiber als auch eine durchschnittslinie (fette schwarze Linie). Abgesehen von den Monaten 7 und 8 zeigt sich, dass die Verfügbarkeit nach einem anfänglichen Niveau von durchschnittlich ca. 70 Prozent in den ersten Monaten kontinuierlich ansteigt. In einigen Verkehrsbetrieben steigt die Verfügbarkeit in einzelnen Monaten bereits auf bis zu 100 Prozent.

¹ http://www.now-gmbh.de/fileadmin/user_upload/RE-Mediathek/RE_Publikationen_MR/Busplattform-Abschlussbericht_fuer_NOW_Version2.pdf

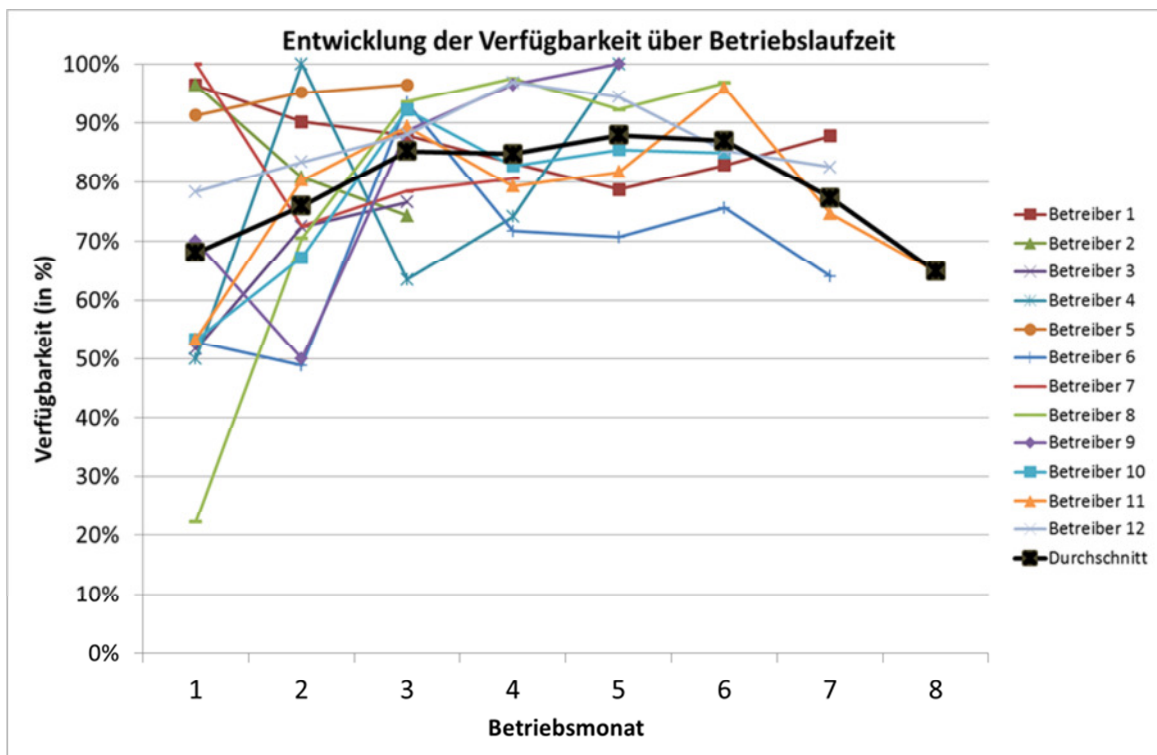


Abbildung 40: Verfügbarkeit der Hybridbusse nach Betrieb

Berücksichtigt man die Jahreszeiten, ist in einigen Verkehrsbetrieben eine starke Verringerung der Verfügbarkeit in den Monaten Januar bis Februar zu sehen. Grund hierfür sind überwiegend temperaturbedingte Ausfälle, die hauptsächlich durch Störungen der Zusatzheizung verursacht wurden (sehr niedrige Temperaturen in den Monaten Januar/Februar 2012). Bei der Darstellung der Verfügbarkeit gestaltet sich ein Vergleich zwischen verschiedenen Standorten jedoch etwas schwierig, da die Busse zum Zeitpunkt der Berichtslegung teilweise erst seit drei Monaten im Einsatz waren. Diese Monate sind dann nicht nur die ersten Monate, sondern auch die kältesten des Jahres (Januar/Februar) gewesen und sind daher nicht repräsentativ für eine langfristige Betrachtung der Entwicklung der Verfügbarkeit. Entsprechend ist die Grafik zur Entwicklung der Verfügbarkeit der Hybridbusse mit einem gewissen Vorbehalt zu betrachten.

Neben der Verfügbarkeit hatten die kalten Monate Januar und Februar vor allem in Sachsen, wo es in der ersten Februarhälfte nachts Temperaturen zwischen -15 und -20°C gab, auch einen großen Einfluss auf den Verbrauch und die Verfügbarkeit der Hybridfahrzeuge.

Es lässt sich im Durchschnitt eine Tendenz zu ca. 85 Prozent Verfügbarkeit erkennen. Einzelne Verkehrsbetriebe erreichen jedoch in einigen Monaten bereits eine Verfügbarkeit von nahezu 100 Prozent.

Da die Fahrzeuge zu einer neuen Generation gehören, sind vereinzelt Verzögerungen bei Reparaturmaßnahmen die Ursache für einen längeren Ausfall der Fahrzeuge. Die Vorhaltung von Ersatzteilen sowie der Ablauf der Reparaturen sind noch nicht in gleichem Umfang bzw. gleicher Effizienz gegeben wie bei den konventionellen Dieselfahr-

zeugen. Diese Verzögerungen können dann zu längeren Ausfallzeiten führen als bei herkömmlichen Bussen. Dies betrifft nicht nur Hybridkomponenten, sondern auch Fahrzeugteile, die auf Grund einer neuen Baureihe zum ersten Mal zum Einsatz kommen und daher noch nicht in größeren Stückzahlen in Ersatzteillagern vorrätig sind. Weitere Erläuterungen zu Reparaturen und Garantiefällen siehe Kapitel 5.1.3 Ersatzteilmanagement.

Abschließend wird die Verfügbarkeit der Hybridbusse mit der Verfügbarkeit der Dieselreferenzbusse verglichen. Die Erfahrung zeigt, dass Dieselbusse zumeist eine Verfügbarkeit von 90 Prozent im Jahresdurchschnitt erreichen. Wie die vorangehende Darstellung bereits zeigte, kann bei den Hybridbussen nach anfänglich niedrigeren Verfügbarkeiten auch durchweg ein positiver Trend hin zu 80-85 Prozent gezeigt werden. Dies entspricht den Erwartungen an eine neue Technologie und übertrifft diese teilweise.

Auf Grund von Fahrzeugeinstellungen und „Kinderkrankheiten“ kann die Verfügbarkeit der Hybridbusse im Vergleich zu Dieselbussen abweichen. Beachtet werden muss hierbei außerdem, dass die betrachteten Dieselbusse in den meisten Fällen bereits länger im Einsatz waren und nicht wie die Hybridbusse gerade die ersten Betriebsmonate absolvieren.

Grundsätzlich sind die Verfügbarkeitswerte während der Projektlaufzeit erfreulich. Im Durchschnitt kamen die Hybridbusse auf eine Verfügbarkeit von 81 Prozent (68-95 Prozent), die Referenzbusse haben im gleichen Zeitraum eine Verfügbarkeit von 92 Prozent (69-99 Prozent) erreicht.

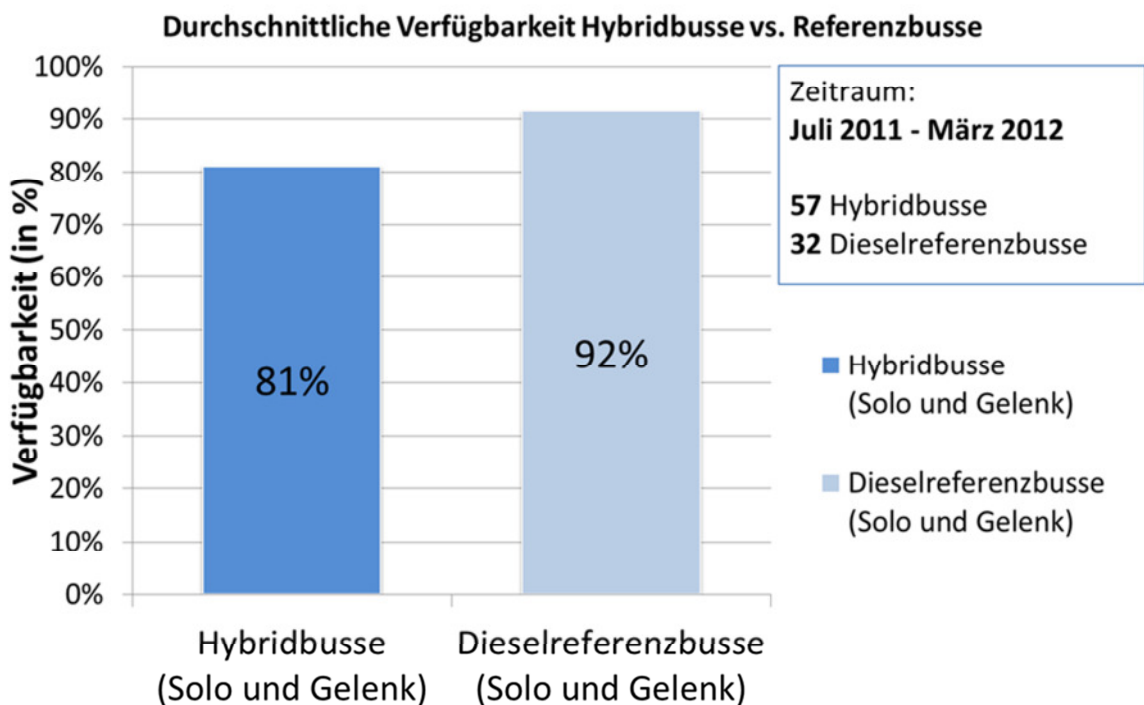


Abbildung 41: Vergleich durchschnittliche Verfügbarkeit Hybrid- vs. Dieselreferenzbusse

Vergleicht man die Verfügbarkeitswerte mit den Werten, die im Rahmen der Busplattform des BMVBS erreicht wurden, so lässt sich hier eine positive Entwicklung sehen. Die Entwicklung über die Betriebslaufzeit ist zwar ähnlich, jedoch erreichten die Busse des vorliegenden Projektes schon nach kürzerer Betriebszeit ein vergleichbares Niveau von ca. 80 Prozent². Es ist also ein Lerneffekt zu erkennen mit dem gleichzeitig auch dokumentiert wird, wie wichtig es ist, Erfahrungen mit dieser noch sehr jungen Technologie zu sammeln, um sie weiterentwickeln zu können.

Technische Zuverlässigkeit (Havariatedatenbank)

Die ursprüngliche Erwartungshaltung hinsichtlich der technischen Zuverlässigkeit in der Anlaufphase wurde von allen im Programm verfügbaren Fahrzeugtypen deutlich übertroffen, wie die Ergebnisse im vorigen Abschnitt zeigen. Zwar zeigte jeder Fahrzeugtyp auch eine Fehlerquelle, die kurz nach Inbetriebnahme mehrere Fahrzeuge betraf (z. B. Temperaturprobleme in der Generatoreinheit oder defekte Summiergetriebe), diese konnten jedoch zeitnah herstellerseitig abgestellt werden.

Die Evaluierung der technischen Zuverlässigkeit erfolgte auf zwei Wegen: Zum einen wurden Ausfalltage, die durch eine Störung im Hybridstrang hervorgerufen wurden, im Rahmen der SoFi-Erfassung mit erhoben. Hierbei erfolgte auch eine Erfassung, wo der Schaden behoben wurde (Vertragswerkstatt/eigene Werkstatt/Herstellereigentum). Zum anderen wurden Havariatedatenblätter an die Verkehrsunternehmen verteilt, in denen alle Schäden (auch die nicht hybridbedingten) dokumentiert wurden und für jedes Fahrzeug noch eine zusätzliche Spezifizierung des Schadens erfolgte.

Abgesehen von den oben bereits erwähnten „Kinderkrankheiten“ gab es in der Dokumentation nur sehr vereinzelt Störungen im Bereich des Elektroantriebs, des Energiemanagements oder der Energiespeicher. Weitaus mehr Kopfzerbrechen bereiteten die Fahrgastraumheizungen der Fahrzeuge während der massiven Kälteperiode im Januar/Februar. Diese Probleme waren nur indirekt als hybridspezifisch zu bewerten.

In der Zusammenfassung der technischen Verfügbarkeit ergeben sich – bezogen auf hybridbedingte Ausfälle – folgende Durchschnittswerte pro Fahrzeug und Monat von 91 bis 98 Prozent.

Vor dem Hintergrund dieser Werte kann man den im Programm eingesetzten Hybridfahrzeugen die Marktreife durchaus attestieren und die Fahrzeuge für weitere Beschaffungsmaßnahmen empfehlen. Gewisse Anlaufschwierigkeiten nach der Inbetriebnahme sind nicht unüblich und sollten bei einer neuen Technologie nicht überbewertet werden. Mit Einführung der nächsten Abgasnorm wird voraussichtlich ähnliches auch bei reinen Dieselfahrzeugen der nächsten Generation zu beobachten sein.

In der Kalkulation der systembedingten Zusatzkosten wurde diesem Umstand Rechnung getragen, indem ein globaler „Inbetriebnahmegroschen“ in Höhe von 2 ct./Fahrzeugkilometer zugeschlagen wurde (vgl. die entsprechenden Ausführungen in

² http://www.now-gmbh.de/fileadmin/user_upload/RE-Mediathek/RE_Publikationen_MR/Busplattform-Abschlussbericht_fuer_NOW_Version2.pdf

Kapitel 5.2.2). Dieser Betrag entspricht etwa einer in den ersten fünf Betriebsjahren um 5 Prozent verringerten technischen Verfügbarkeit.

5.1.2.2 Effizienz / Kraftstoffverbrauch

Im Folgenden werden die Ergebnisse aus der Betriebsdatenerfassung zum Kraftstoffverbrauch dargestellt. Hierzu einige Vorbemerkungen, die für die richtige Einordnung der gezeigten Werte wichtig sind.

Linienreiner Einsatz

Wie bereits beschrieben, waren die Verkehrsbetriebe dazu angehalten, ihre Hybridfahrzeuge sowie ihre Dieselfahrzeuge linienrein einzusetzen, um einen bestmöglichen Vergleich zum Kraftstoffeinsatz zu erzielen. Dies konnte auf Grund von betrieblichen Planungen nicht in allen Verkehrsbetrieben zu 100 Prozent umgesetzt werden.

Vergleichbarkeit Diesel- und Hybridfahrzeuge

Relevant für den Vergleich der Kraftstoffverbräuche zwischen den Hybridbussen und den konventionellen Dieselreferenzfahrzeugen ist weiterhin der technische Stand der Fahrzeuge. Für eine gute Vergleichbarkeit entspricht idealerweise das Referenzfahrzeug in technischer Ausstattung (z.B. Abgasnorm, Klimatisierung) und Alter möglichst den Charakteristika des Hybridfahrzeuges. Dies war erwartungsgemäß nicht an allen Standorten möglich.

Datenverfügbarkeit/ Erfassungszeitraum

Wie bereits erwähnt, konnten an einigen Standorten nur Daten für einen relativ kurzen Zeitraum erfasst werden, d.h. die Fahrzeuge befinden sich noch in der „Einlaufphase“. Darüber hinaus liegen die kältesten Monate des Jahres (Dezember und vor allem Januar und Februar) im Beobachtungszeitraum, d.h. es ist für den Datenerfassungszeitraum nicht von einem wirklichen „Standardbetrieb“ zu sprechen.

Die Ergebnisse sind aufgrund der genannten Aspekte daher zunächst nur eingeschränkt interpretierbar.

Dabei ist Folgendes zu berücksichtigen:

- Ausgewertet wurde bezüglich des Kraftstoffverbrauchs nur ein ganztägig linienreiner Einsatz, da i.d.R. nur einmal täglich eine Betankung erfolgte. Dadurch ist teilweise nur ein kleinerer Teil der Daten einbezogen.
- Statistische „Ausreißer“ wurden eliminiert, d.h. nicht in die Bewertung einbezogen.
- Bezüglich des Verbrauchs für die Zusatzheizung wurde der Gesamtverbrauch in Relation zur Gesamtleistung über den Betrachtungszeitraum einbezogen. Zum großen Teil handelt es sich sowohl bei den Diesel-Referenzbussen als auch bei den Hybridbussen um einen mit höheren Verbräuchen einhergehenden Winterbetrieb.

Die folgende Grafik zeigt die Kraftstoffeinsparung der Hybridbusse im Vergleich zu ihren Dieselreferenzbussen. Hier zeigt sich auf den verschiedenen Linien ein sehr heterogenes Bild: 12 Linien können bereits eine Verbrauchseinsparung zwischen 6 und 19 Prozent vorweisen, während auf drei Linien noch ein Mehrverbrauch von 3, 10 bzw. 13 Prozent zu verzeichnen ist. Dies hat unterschiedliche Gründe haben, u.a. können topographisch anspruchsvollere Linien hier je nach Antriebskonzept einen entscheidenden Einfluss auf den Mehrverbrauch haben. Dies ist dem Hubraum reduzierten Motor des Hybridbusses im Vergleich zum Dieselbus geschuldet. Ein weiterer Einflussfaktor für den Verbrauch der Hybridbusse ist die Größe des Energiespeichers.

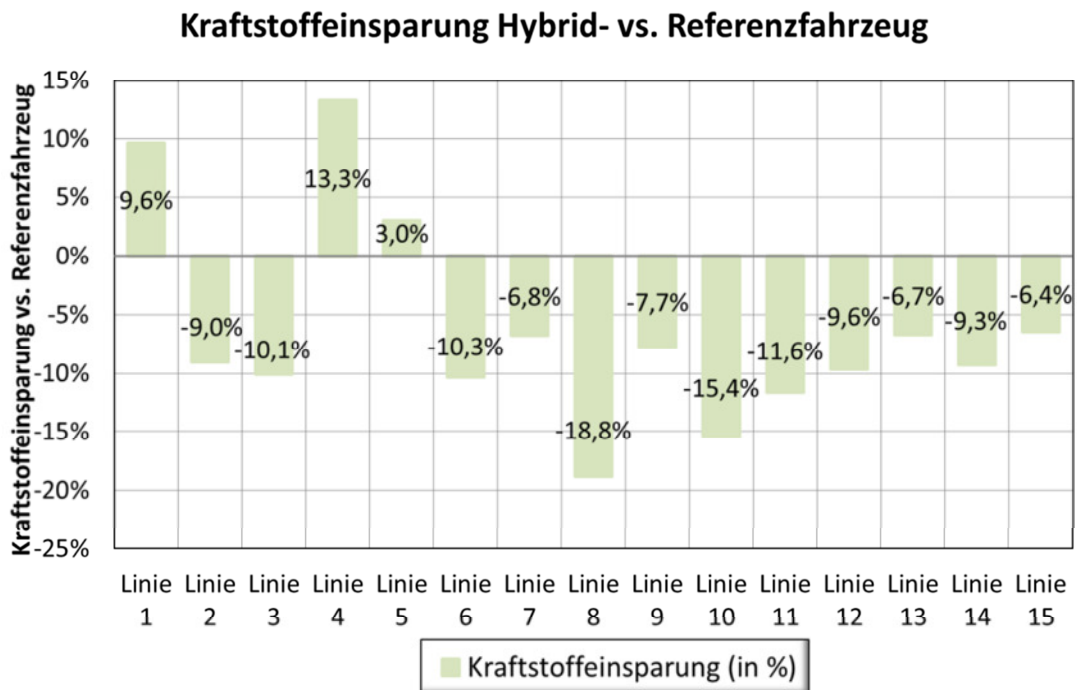


Abbildung 42: Kraftstoffeinsparung Hybrid- vs. Referenzfahrzeug³

Zur weiteren Analyse der Verbräuche werden im Folgenden die Verbrauchsunterschiede in Abhängigkeit von zwei Eigenschaften der Linien dargestellt. Dies sind die Durchschnittsgeschwindigkeit der Linie und die durchschnittlichen Höhenmeter je km als Topographieindikator.

³ Die Linien 8, 10, 13 und 14 sind nur eingeschränkt vergleichbar, da die Referenzbusse ältere Euro III-Fahrzeuge sind.

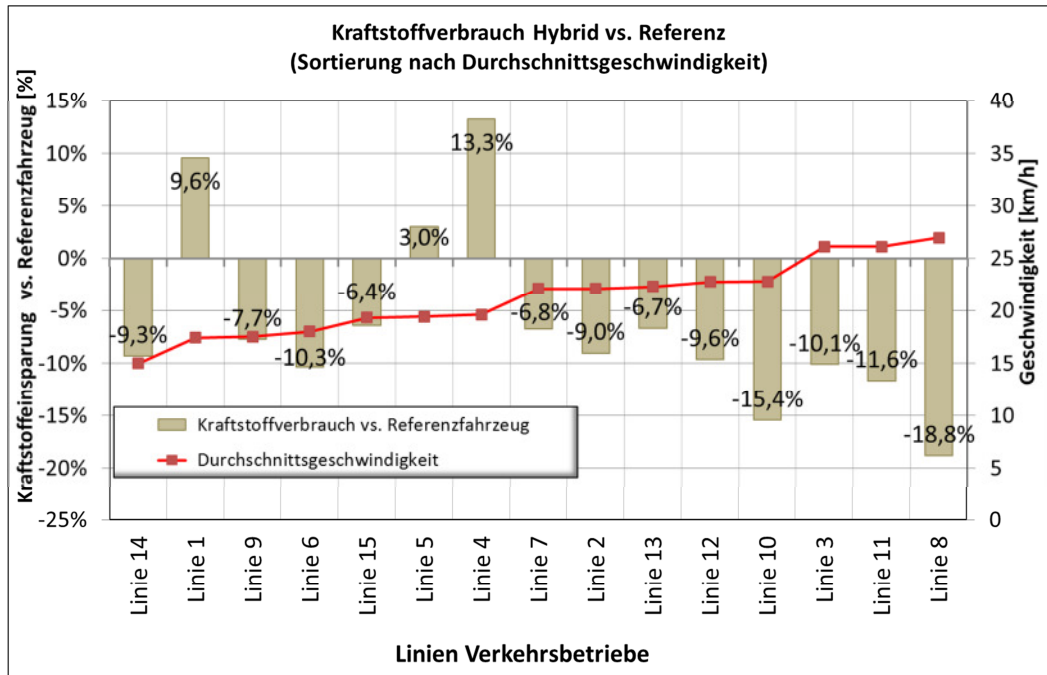


Abbildung 43: Kraftstoffverbrauch Hybrid vs. Referenzbus (Sortierung nach Geschwindigkeit)⁴

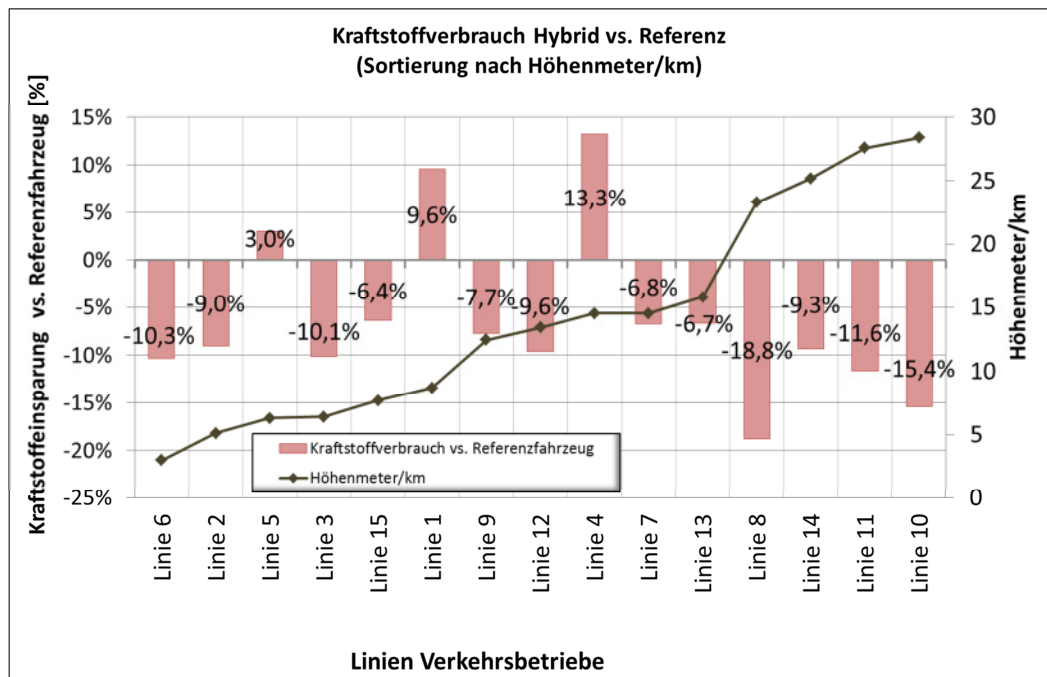


Abbildung 44: Kraftstoffverbrauch Hybrid vs. Referenzbus (Sortierung nach Höhenmetern)⁵

Die Daten beziehen sich rein auf den Fahrantriebsverbrauch, d.h. die Verbräuche der Zusatzheizung sind hier nicht mitberücksichtigt.

⁴ Die Linien 8, 10, 13 und 14 sind nur eingeschränkt vergleichbar, da die Referenzbusse ältere Euro III-Fahrzeuge sind.

⁵ Die Linien 8, 10, 13 und 14 sind nur eingeschränkt vergleichbar, da die Referenzbusse ältere Euro III-Fahrzeuge sind.

Die Ergebnisse zeigen auf Basis der gegenwärtig verfügbaren Daten noch keine klare Tendenz. Vielmehr ergibt sich teilweise eine gewisse Widersprüchlichkeit, da eigentlich tendenziell eine höhere Einsparung auf Linien mit geringerer Geschwindigkeit zu erwarten wäre, da sich diese niedrigere Durchschnittsgeschwindigkeit üblicherweise aus häufigeren Anfahr- und Bremsvorgängen ergibt und dabei der Hybrid seine Konzeptvorteile der Bremsenergieerückgewinnung (Rekuperation) geltend machen kann. Jedoch zeigen die Ergebnisse auf ähnlichen Geschwindigkeitsprofilen sehr unterschiedliche Verbrauchswerte, sodass sich hier nur schwer ein Zusammenhang erkennen lässt. Grundsätzlich ist als erfreulich zu bewerten, dass der Linieneinsatz im Regionalverkehr mit seinen höheren Geschwindigkeiten Verbrauchseinsparungen von 10 Prozent und mehr bietet⁶. Dies war so nicht unbedingt zu erwarten.

Betrachtet man die Sortierung entsprechend der Topographie, also der Höhenmeter je km, so ergibt ein erster Eindruck ein ebenso heterogenes Bild. So erreichen Linien mit eher flachem Höhenprofil ebenso Einsparungen im zweistelligen Bereich wie Linien, die Strecken mit einem Höhenunterschied von 20-27 Hm/km zurücklegen.

Da die meisten Standorte nur eine sehr kurze Betriebsdauer von 2-3 Monaten aufweisen, ist ein direkter Vergleich nur bedingt angebracht. Die obige Darstellung ist vielmehr als erster Trend zu verstehen.

Es zeigt sich also insgesamt, dass es mit der derzeit verfügbaren Datenbasis schwierig ist, bereits aussagekräftige Schlussfolgerungen zu ziehen. Zwar hat die Verlängerung des Begleitprogramms die Erhebung der Betriebsdaten überhaupt erst ermöglicht, jedoch würde eine Erhebung der Betriebsdaten über einen längeren Zeitraum von zumindest einem Jahr eine wesentlich verlässlichere Datenbasis ergeben, auch hinsichtlich der Berücksichtigung der Temperatureinflüsse und einer weiteren Stabilisierung der Fahrzeuge im Betrieb.

Die Bandbreite der Einsparungen im Ganzen ist vergleichbar mit den Einsparungen im Rahmen des Hybridbuseinsatzes in den Modellregionen Elektromobilität, es konnte dort allerdings ein größerer Anteil der Busbetreiber Kraftstoffeinsparungen im zweistelligen Bereich erreichen. So hat knapp die Hälfte (sieben von 18) Betreibern eine Einsparung im zweistelligen Bereich erreicht, fünf weitere lagen im Bereich von 2 bis 9 Prozent⁷. Jedoch hatten auch hier Betreiber einen Mehrverbrauch zu verzeichnen: vier Unternehmen wiesen während der Projektlaufzeit einen Mehrverbrauch auf. Dieser war mit einer hohen Streubreite der Verbrauchswerte verbunden⁸. Weiterhin ist zu erwähnen, dass die Daten aus dem BMVBS über einen längeren Betriebszeitraum von einem Jahr untersucht wurden, sodass hier die Thematik des Kälteeinflusses und dem damit verbundenen Mehrverbrauch nicht so deutlich ins Gewicht fällt wie bei den vorliegenden Ergebnissen, die vor allem aus den Wintermonaten Dezember bis Februar stammen.

⁶ Hier ist wiederum die teilweise eingeschränkte Vergleichbarkeit der Fahrzeuge zu berücksichtigen.

⁷ Es ist dabei aber zu berücksichtigen dass die Einsatzbedingungen nicht direkt miteinander vergleichbar sind. So weisen die im vorliegenden Vorhaben untersuchten Linien insgesamt höhere Durchschnittsgeschwindigkeiten auf, da hier ein deutlich höherer Anteil an Regionalverkehrslinien gegeben ist.

⁸ S. Abschlussbericht Busplattform: http://www.now-gmbh.de/fileadmin/user_upload/RE-Mediathek/RE_Publikationen_MR/Busplattform-Abschlussbericht_fuer_NOW_Version2.pdf, Seiten 58-60

5.1.2.3 Ökologie und Klimaschutz

Untersucht man den Umwelteinfluss der gesamten Hybridbusflotte über die Dauer des Betriebes innerhalb des Projektes, so ergibt sich folgendes Bild:

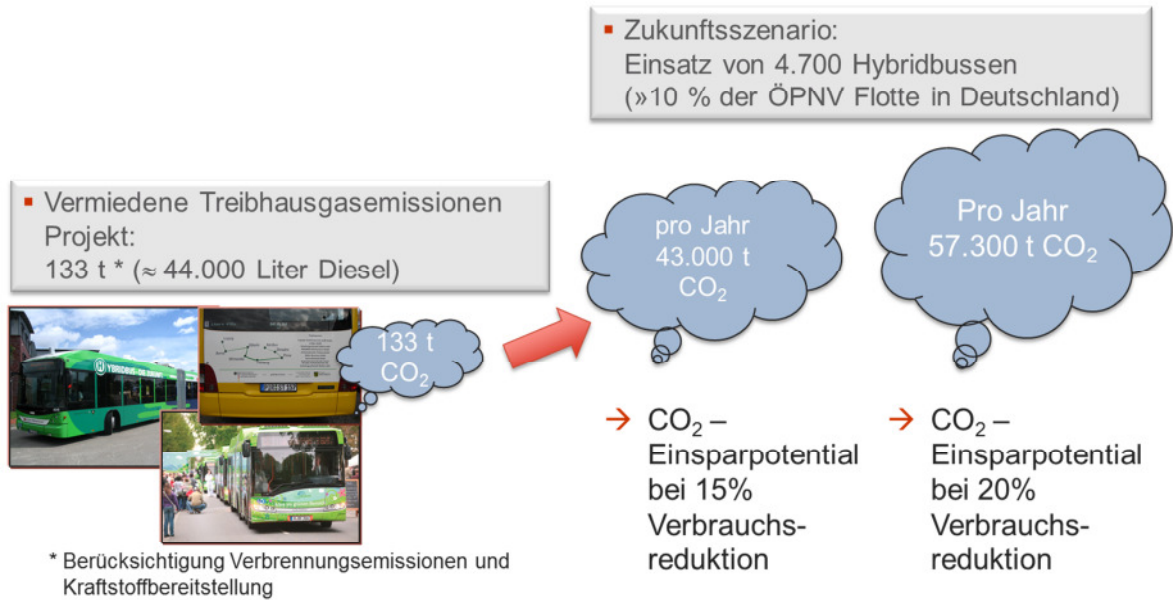


Abbildung 45: Treibhausgaseinsparung Hybridbusse vs. Referenzfahrzeuge im Projekt

Im Zeitraum zwischen Juli 2011 und März 2012 konnten mit der im Rahmen dieses Projektes betriebenen Hybridbusflotte 133 t CO₂ vermieden und 44.000 Liter Diesel eingespart werden. Darauf aufbauend kann folgendes Szenario betrachtet werden:

Wenn man von einer durchschnittlichen Kraftstoffeinsparung von 15 bzw. 20 Prozent ausgeht, die mit Hybridbussen erreicht werden soll, so könnte man einen großen Beitrag zur Treibhausgasvermeidung leisten. Werden beispielsweise nur 10 Prozent der erbrachten Fahrzeugkilometer im ÖPNV von Hybridbussen mit einer durchschnittlichen Kraftstoff-einsparung von 15 bzw. 20 Prozent erbracht, so ergibt sich ein jährliches Treibhausgasvermeidungspotential von ca. 43.000 t bzw. 57.000 t.

5.1.3 Ergebnisse zum Ersatzteilmanagement

Die Erfahrungen zu Bedarf und Verfügbarkeit der Ersatzteile sowie den erforderlichen Anpassungen bei der Infrastruktur wurden über die in AP 2.1 erhobenen Daten zu Fahrzeugstatus und über vorstrukturierte Befragungen der Busbetreiber (auch im Rahmen der Kostenberechnungen von AP 1) sowie, je nach Verfügbarkeit, Auswertung von fahrzeugbezogenen Wartungsdatenerfassungssystemen erhoben.

Die Ergebnisse des AP 2 dienen neben weiteren Informationen als Eingangsgrößen zu AP 1, um eine umfassende Kostenbetrachtung zu ermöglichen. Gleichzeitig wurden auch Teile der Datenerfassung in Bezug auf fahrzeugbezogene Wartung und Instandhaltung (z. B. Ersatzteilbedarf) in AP 1 durchgeführt.

Aus Befragungen bei Herstellern und Ersatzteillieferern konnte ein allgemeines Ablaufschema zum Wartungsprozess erarbeitet werden (siehe Abbildung 46).

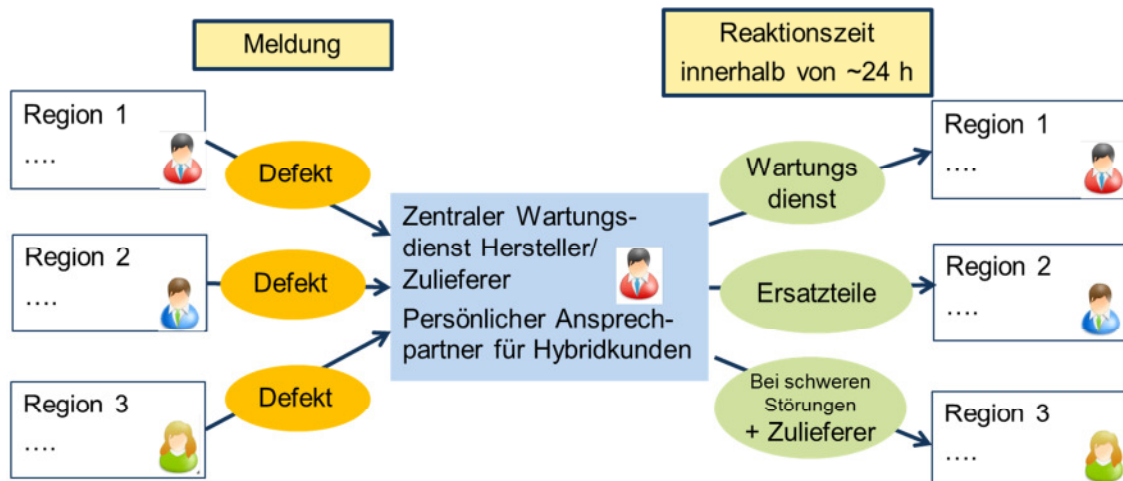


Abbildung 46: Ablaufschema Wartungsprozess beim Hybridbus

Nach weiteren Gesprächen mit Herstellern und Busbetreibern kann der Wartungsprozess -abgesehen von kleinen Unterschieden- allgemein wie folgt beschrieben werden:

Grundsätzlich erfolgt zunächst eine Fehlerdiagnose durch eine unterwiesene Person. Dies ist entweder ein Mitarbeiter des Busbetreibers, ein Vertreter des Busherstellers oder des Komponentenherstellers. Unterwiesene Personen sind Personen, die auf Grund einer speziellen Qualifizierung bzw. Ausbildung berechtigt sind, verschiedene Arbeiten am Hochvoltsystem, wie u.a. eine qualifizierte Fehlerdiagnose, durchzuführen.

Diese berechtigte Person fordert dann ggf. Ersatzteile bzw. den Fahrzeugservice des Herstellers an, die in der Regel innerhalb von 24 Stunden eintreffen.

Die Ersatzteilverhaltung von speziellen Hybridkomponenten befindet sich derzeit noch im Aufbau und wird sukzessive in den Standardprozess für Serienerersatzteile integriert; dieser Prozess wird mit Zunahme der Hybridfahrzeuge stetig erweitert und optimiert. Erste Praxiserfahrungen sollen hier Hinweise auf Ersatzteile geben, die besonders häufig benötigt werden, sodass die Ersatzteilverhaltung optimiert und den Bedürfnissen der Verkehrsbetriebe angepasst werden kann.

Da sich die Fahrzeuge derzeit noch in der Garantielaufzeit befinden, werden Reparaturen von den Bus- oder Komponentenherstellern übernommen. Um den Werkstätten die Möglichkeit zu geben, einzelne Arbeiten selbst übernehmen zu können, ist die Schulung der Werkstattmitarbeiter durch die Hersteller geplant.

Die Zertifizierung der Werkstattmitarbeiter geschieht zunächst unabhängig von hybrid-spezifischen Komponenten; erst im Anschluss an diese „Standardqualifizierung“ erfolgt die Schulung bezüglich der hybridspezifischen Komponenten.

Aktualisierung 1. Quartal 2012

Zum Ende des Projektes wurden die beteiligten Fahrzeughersteller erneut zur Ersatzteilversorgung befragt. Hier hat sich nach Angaben der Fahrzeughersteller bzw. von deren Vertriebs- und Logistikpartnern für Ersatzteile kein signifikant neuer Sachstand ergeben.

Die Ersatzteillieferanten sind weiterhin dabei, die Lagerhaltung für Hybridkomponenten aufzubauen. Die vorhandene Lagerhaltungsliste wird auf Basis der aktuellen Ersatzteilabforderungen durch die Wartungsingenieure ständig aktualisiert, anhand der Abfragedaten werden die abgerufenen Komponenten automatisiert nachgeordert.

Bei zwei Herstellern ist die Ersatzteilverhaltung für die Hybridkomponenten in das allgemeine Ersatzteilmanagement integriert, wobei auch hier nicht von einem abschließenden Stand gesprochen werden kann. Die Ersatzteilabfrage während der Gewährleistungsphase erfolgt über die herstellereigenen Wartungsingenieure vor Ort. Teilweise besteht für Großkunden optional die Möglichkeit, eigenständig Ersatzteile direkt zu ordern.

Eine Aussage über „typische“ Verschleißteile ist nach Aussage der Hersteller in Anbetracht der noch kurzen Einsatzdauer nicht möglich. Die Notwendigkeit zur Vorhaltung eines kompletten Hybridantriebsstrangs wird zur Zeit in aller Regel nicht gesehen.

Prinzipiell ist bei allen Herstellern eine gewisse Zurückhaltung bei der Informationspreisgabe bezüglich der abgeforderten Ersatzteile zu erkennen – aus verständlichen und nachvollziehbaren Gründen, denn letztlich können aus den Daten Rückschlüsse auf bestimmte Bereiche der Fahrzeugentwicklung gezogen werden.

Man muss auch einräumen, dass die Daten, die im zeitlichen Rahmen dieses Prüfprogramms im Bereich Ersatzteilmanagement erhoben werden konnten, für die gesamte Lebenszyklusbetrachtung der Fahrzeuge von recht eingeschränkter Aussagekraft sein dürften: Bei Komponenten, die in den ersten Betriebsmonaten ausfallen, dürften die Ausfallursachen eher noch im Entwicklungsbereich anzusiedeln sein. Für die Gesamtbetrachtung eines Fahrzeuglebens sind dagegen vielmehr diejenigen Komponenten interessant, die nach einer längeren Einsatzdauer von mehreren Jahren verschleißbedingt ausfallen.

Ein weiterer, für die Betrachtung von Hybridbussen besonders interessanter Aspekt wird sich ebenfalls erst nach einigen Betriebsjahren bewerten lassen, nämlich ob die Traktionsenergiespeicher die zugesagten Laufzeiten von sechs bis acht Jahren tatsächlich erreichen.

5.1.4 Erfahrungen bei der Inbetriebnahme und aus dem Linienbetrieb

5.1.4.1 Erfahrungen bei der Inbetriebnahme

Alle am Programm beteiligten Verkehrsunternehmen wurden über ihre Erfahrungen bei der Inbetriebnahme der Hybridbusse befragt (Fragebogen s. Anhang B 2). Unter Inbetriebnahme werden folgende Verfahrensschritte verstanden:

- Fahrzeugzulassung
- Technische Inbetriebnahme des Fahrzeugs am Einsatzort
- Inbetriebnahme kundenspezifischer Anlagen (Fahrscheindrucker/Kasse, RBL-Bordrechner, Entwerter, Fahrgastinformationseinrichtungen etc.)
- Personalunterweisung
- Mängelfeststellung

Die Erhebung wurde mit einem einheitlichen Fragebogen durchgeführt. In Summe lässt sich sagen, dass die Inbetriebnahme bei allen Verkehrsunternehmen ohne größere Probleme abgelaufen ist. Vor dem Hintergrund, dass bis auf die Großunternehmen DVB, LVB und üstra bei keinem teilnehmenden Unternehmen vorher Hybridbusse eingesetzt wurden, ist das eine erfreuliche Feststellung.

Fahrzeugzulassung

Dass auch viele Zulassungsstellen bei der Zulassung von Hybridbussen Neuland betreten, äußert sich in den im Detail teils recht verschiedenen Anforderungen bezüglich der einzureichenden Dokumente. Hier wurden neben Fahrzeugschein und –brief in sehr unterschiedlichem Ausmaß zusätzliche Bescheinigungen und Bestätigungen abgefordert. Gleichwohl wurde an einzelnen Orten auch nicht zwischen Hybrid- und sonstigen Bussen unterschieden. Dokumente zur Verzollung waren nur dort erforderlich, wo Fahrzeuge ausländischer Produktion (Hess/Solaris) zum Einsatz gebracht wurden, jedoch auch dies nach den Angaben in der Befragung uneinheitlich.

Technische Inbetriebnahme des Fahrzeugs am Einsatzort

Die technische Inbetriebnahme der Hybridbusse erfolgte bei den Verkehrsunternehmen in aller Regel ohne nennenswerte Probleme. Nur zwei Unternehmen führten die Inbetriebnahme nach einem standardisierten Protokoll durch. Für die Inbetriebnahme wurden im Durchschnitt ca. 2 Stunden angesetzt, eine gesonderte Abnahme des Hybridteils wurde von keinem Unternehmen angegeben.

Eine elektrotechnische Abnahme wurde in der Regel durch den Hersteller durchgeführt und dokumentiert, wobei dies in Einzelfällen zu Differenzen geführt hat, was sich auch in den uneinheitlichen Angaben bei der Befragung widerspiegelt. Nach vorliegenden Informationen wurde die herstellerseitige Abnahme für alle Verkehrsunternehmen einheitlich durchgeführt, die Interpretation dieser Leistungen durch die Kunden fiel jedoch offenbar unterschiedlich aus. Hier besteht künftig ein verstärkter Kommunikationsbedarf zwischen Hersteller und Abnehmer.

Personalunterweisung

Die Arbeitsschutzbelehrung der Mitarbeiter erfolgte in den meisten Fällen mit Unterstützung der Hersteller – entweder durch Schulungsangebote (Weitergabe an die Belegschaft teils über Multiplikatoren) oder Lehrmaterial. In Lübeck wurde zusätzlich ein genereller Lehrgang „Fachkundiger für Arbeiten an HV-Eigensicheren Systemen“ angeboten.

Mängelfeststellung

Mängelanzeigen im Zuge der Inbetriebnahme gab es lediglich bei einem Verkehrsbetrieb, bei einem weiteren wurden bei der Übergabe festgestellte Mängel am allgemeinen Fahrzeugteil noch vor der Überführung der Fahrzeuge im Herstellerwerk behoben. Die durchschnittliche Zeitdifferenz zwischen der Auslieferung und dem ersten Linieneinsatz betrug 28 Tage (18-35 Tage).

Dieser Wert lässt jedoch keine unmittelbaren Rückschlüsse auf Probleme bei der Inbetriebnahme zu, da verschiedene Gründe – beispielsweise eine Publikumspräsentation, erweiterte Testfahrten oder die ausschließliche Nutzung für Schulungsfahrten nach der Inbetriebnahme – zu einem verzögerten Linieneinsatz führten.

5.1.4.2 Erfahrungen aus dem Linienbetrieb

A. Einsatz im Linienbetrieb und Erfassung der Tank- und Fahrleistungsdaten

Innerhalb dieses Vorhabens wurden die Hybridfahrzeuge erstmalig auch im Regionalverkehr und im Stadtverkehr von kleineren Mittelstädten eingesetzt. Die Dienstgestaltung und damit auch der Einsatz der Fahrzeuge unterscheiden sich in sehr starkem Maße vom Vorgehen in Großstädten. Während es in Großstädten ohne größere Probleme möglich ist, mit den Bussen linientreu zu fahren, ist das im Regionalverkehr und in kleineren Städten nicht der Fall. Um die Fahrzeuge wirtschaftlich einzusetzen, müssen Fahrten von mehreren Linien verbunden werden, so dass möglichst wenige Standzeiten entstehen. Von den Verkehrsbetrieben wurde in diesen Fällen versucht, für den vergleichenden Einsatz von Diesel- und Hybridbussen möglichst ähnliche Dienste auszuwählen und die Fahrzeuge regelmäßig auf diesen Routen einzusetzen. Jedoch war das von den betrieblichen Erfordernissen abhängig und nur mit Abstrichen durchführbar. Regelmäßige Variationen der innerhalb eines Dienstes zu befahrenden Routen traten bei einigen Verkehrsunternehmen z. B. im Schülerverkehr sogar in Abhängigkeit vom Wochentag auf. Ferienfahrpläne änderten die Routenführung und Betriebszeiten ähnlicher Dienste ebenfalls. In manchen Fällen kamen in den Nachtstunden noch zusätzliche Fahrten im Schienenersatzverkehr dazu, die über einen Zeitraum von einigen Wochen regelmäßig notwendig waren.

Obwohl die Fahrzeuge auf solchen Linienkombinationen eingesetzt werden, ist es häufig der Fall, dass der Einsatz durch längere Pausen (z. B. in den späten Vormittagsstunden) unterbrochen wird. Bei der Erfassung der Fahrzeugbetriebszeiten wurde versucht, die Dauer dieser großen Einsatzunterbrechungen von der Gesamteinsatzzeit des jeweiligen Fahrzeugs abzuziehen. Kleinere Pausen (vorgeschriebene Pausen für Fahrer, längere Wendezeiten) sind in den erhobenen Betriebszeiten dagegen in der Regel enthalten. Jedoch gibt es in manchen Fällen auch Fahrzeugeinsatzschemata in denen solche Pausen nicht auftreten.

Die Unterscheidung von Ausfallzeiten hinsichtlich ihrer Ursache (Wartung, normaler Defekt, Defekt am Hybridsystem) war während der laufenden täglichen Datenerfassung nur abschätzungsweise möglich. Zum einen war aus den aufgetretenen Fehlermeldungen nicht immer auf die Ursache zu schließen, zum anderen wurden bei Werkstattaufenthalten im Normalfall alle angefallenen Arbeiten erledigt (siehe auch Kapitel 5.1.2.1 zu Praxistauglichkeit und Einsatzreife).

In den Zeitraum der Betriebsdatenerfassung fiel auch eine Periode starken Frostes (unter -20 °C). Dadurch waren teilweise Maßnahmen zur Erhaltung der Fahrzeugeinsatzbereitschaft notwendig, die den Kraftstoffverbrauch der Fahrzeuge beeinflussten und nicht den Linienfahrten zugerechnet werden können (siehe auch Kapitel 5.1.2.2 zu Verbrauchsanalyse).

B. Erfahrungen, Bewertungen und Akzeptanz von Fahrern und Fahrgästen

Nach Aufnahme des Linienbetriebes mit den im Rahmen des Projektes beschafften Hybridbussen wurden die Fahrer nach ihren Erfahrungen beim Linieneinsatz dieser Fahrzeuge befragt. Gleichzeitig wurden die Eindrücke und die Akzeptanz von Fahrzeugen und Technologie unter den Fahrgästen und Passanten ermittelt. Im Folgenden werden die wichtigsten Ergebnisse dieser Untersuchungen dargestellt.

Erfahrungen der Fahrer und Fahrerinnen beim Hybridbuseinsatz

Grundlage dieser Untersuchung sind die Angaben von Fahrern der Verkehrsbetriebe aus Hannover, Lübeck, Dresden, Leipzig, Freital, Meißen, Freiberg, Döbeln, Mittweida und dem Dresdner Umland.⁹ Die Erfahrungen der Fahrer und Fahrerinnen wurden mittels eines einheitlichen Fragebogens ermittelt. Bei den Städten Dresden und Leipzig wurde auf Daten zurückgegriffen, die kurz zuvor in einem anderen Projekt¹⁰ mit annähernd gleichlautender Fragestellung erhoben wurden.

Insgesamt beteiligten sich 141 Fahrer und Fahrerinnen an der Befragung. Die Herkunft aus den Verkehrsbetrieben der jeweiligen Regionen zeigt die nachfolgende Grafik, wobei die Antworten aus den die Mittelstädte und den Regionalverkehr bedienenden Verkehrsunternehmen der ARGE RegioHybrid unter der Bezeichnung VU RegioHybrid zusammengefasst wurden.

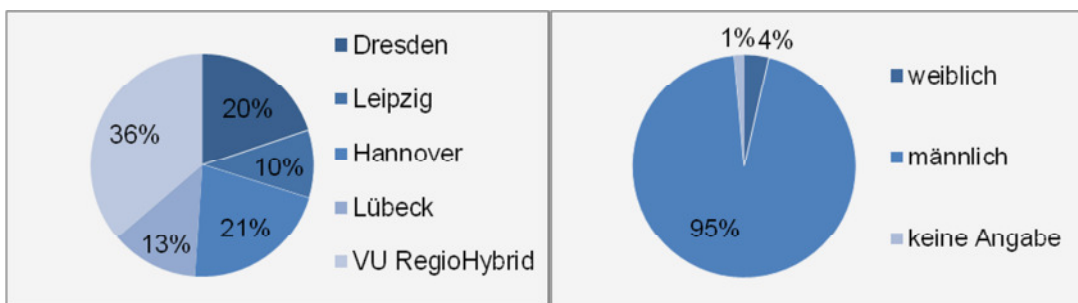


Abbildung 47: Zugehörigkeit der teilnehmenden Fahrer zu Städten und Regionen (links) und Anteil von Frauen und Männern unter den Befragten (rechts)

Charakterisierung der Fahrer und Fahrerinnen

Die Fahrer und Fahrerinnen verfügten in der Mehrzahl über eine langjährige Berufserfahrung (im Durchschnitt 20 Jahre) und waren etwa genauso lange beim jeweiligen Verkehrsbetrieb beschäftigt. Sie waren zum Zeitpunkt der Befragung im Durchschnitt (Median) an 5 Tagen mit den Bussen im Einsatz. Ein großer Teil von Ihnen verfügte jedoch über eine wesentlich längere Erfahrung mit den Bussen (100 bis 200 Stunden).

⁹ üstra Hannoversche Verkehrsbetriebe AG, Stadtverkehr Lübeck GmbH, Dresdner Verkehrsbetriebe AG, Leipziger Verkehrsbetriebe GmbH, LeoBus GmbH, Regionalverkehr Dresden GmbH, Verkehrsgesellschaft Meißen mbH, Verkehrsbetriebe Freiberg GmbH, Verkehrsgesellschaft Döbeln mbH, Regiobus Mittelsachsen GmbH, Müller Busreisen GmbH, Satra Eberhardt GmbH

¹⁰ Busplattform im Rahmen des Förderprogramms Modellregionen Elektromobilität des BMVBS; Abschlussbericht unter http://www.now-gmbh.de/fileadmin/user_upload/RE-Mediathek/RE_Publikationen_MR/Busplattform-Abschlussbericht_fuer_NOW_Version2.pdf

Eine ausreichend lange Zeit zum Erkennen von Besonderheiten im Umgang mit den Fahrzeugen war somit gegeben. Mehr als drei Viertel der Fahrer hatten Weiterbildungskurse besucht (z. B. sparsames Fahren, defensives Fahren usw.). Somit waren die Fahrer in der Gesamtheit gut ausgebildet und befähigt, die Eigenschaften der Hybridbusse vergleichend einzuschätzen.

Fahrerunterweisung Hybridfahrzeug

Für den Einsatz mit den Hybridfahrzeugen erhielten die Fahrer eine Unterweisung im Umfang von durchschnittlich zwei Stunden. Die Fahrer bewerteten die Unterweisungen in der Regel als gut und ausreichend. Gehäuft wünschten sie sich jedoch eine intensivere praktische Ausbildung, die zusätzlich in zeitlicher Nähe zum Einsatz mit den Hybridbussen liegen sollte. In mehreren Antworten wurde der Wunsch nach regelmäßiger Wiederholung und Auffrischung des Gelernten angebracht.

Umstellung auf Hybridfahrzeug

Die Fahrer empfanden die Umstellung auf den Hybridbus in der überwiegenden Mehrheit von 90 Prozent als nicht schwierig. Als Gegebenheiten, die eine gewisse Umstellung erforderten wurden genannt:

- die veränderte Gestaltung des Fahrerarbeitsplatzes (Armaturenbrett, Bedienelemente, Sichtfeld, Stauraum, Bewegungsraum),
- die im Ablauf andere und zeitaufwändigere Startprozedur,
- ein anderes Verhalten beim Bremsen, Beschleunigen und Lenken,
- die Start-Stopp-Automatik und damit verbunden das fehlende Motorengeräusch und das lautlose Fahren.

Untertägiger Wechsel zwischen Antriebstechnologien

Der Wechsel zwischen konventionellem Dieselbus und Hybridbus innerhalb eines Tages wurde unterschiedlich empfunden. Viele Fahrer sahen in solchen Wechseln nach einer kurzen Eingewöhnungsphase kein Problem und betrachteten es grundsätzlich als normal, zwischen Fahrzeugen mit differierenden Bedienungsstrategien zu wechseln. Andere gaben den Wechsel zwischen den Fahrzeugen als zum Teil sehr unangenehm an. Einige freuten sich darauf, wieder mit den Hybridbussen fahren zu können, weil diese ruhiger und geräuschärmer liefen. Das Anfahrverhalten wurde in der Mehrzahl als ruhiger, gleichmäßiger und angenehmer beschrieben, wobei es teilweise auch als langsamer bewertet wurde. Beim Beschleunigen stellten die Fahrer oftmals eine Leistungslücke beim Umschalten vom elektrischen Betrieb auf das Fahren mit Dieselmotor fest. Insgesamt wurde das Beschleunigungsverhalten von zwei Dritteln der Fahrer mit gut oder sehr gut bewertet. Bei allen Fahrzeugtypen wurde als wesentlicher Unterschied im Bremsverhalten die Möglichkeit genannt, das Fahrzeug gleichmäßiger, ruhiger, exakter und angenehmer abbremsen zu können. Kritisch angemerkt wurde in diesem Zusammenhang, dass bei einigen Fahrzeugen im elektrischen Fahrmodus ein

stärkerer Druck auf das Bremspedal notwendig sei als im Dieselbetrieb und dadurch Gefährdungen entstehen könnten.

Fahrerarbeitsplatz

Die Hinweise zur Gestaltung des Fahrerarbeitsplatzes sind vielfältig und die Einschätzungen sind zum Teil davon geprägt, an welche Arbeitsplatzgestaltung die Fahrer bei den Dieselnissen gewohnt waren. Die Signalisierung des Speicherladegrades und der Energieeffizienz wurde gelobt und es wurde darauf hingewiesen, dass dies zum sparsamen Fahren anregt. So versuchten die Fahrer ihre Fahrweise entsprechend anzupassen, obwohl der Fahrplan dafür wenig Spielraum ließ.

Klimatisierung Fahrgastraum

Die Klimatisierung des Fahrgastraumes beurteilten die Fahrer häufig mit neutral, weil sie davon meist nicht direkt betroffen waren. Abhängig davon, ob Fahrerfahrten vom Sommer- oder vom Winterbetrieb vorlagen, konnten die Fahrer nur die Heiz- oder die Kühlwirkung beurteilen. Beide wurden im Gesamtbild über alle Fahrzeuge als teilweise zu schwach angegeben, so dass diesbezüglich noch Optimierungsbedarf besteht.

Geräusch- und Vibrationsverhalten

Die meisten Fahrer bewerteten die Geräusche und Vibrationen in den Hybridbussen als leiser und schwächer und damit angenehmer. Als störend wurde das Pfeifen der Elektronik beurteilt. In gleicher Weise äußerten sich Fahrgäste gegenüber den Fahrern. Auch wurden die Geräusche von Heizung und Lüftung als laut empfunden.

Störungen/Fehler im Betrieb

Bei 61 Prozent der Fahrer und Fahrerinnen waren die Einsatzfahrten mit den Hybridbussen störungs- und fehlerfrei. Die bei den übrigen auftretenden Störungen waren unterschiedlicher Natur und betrafen durchaus nicht nur das Hybridsystem. Als weiterer häufiger Fehler wurde berichtet, dass der Dieselmotor ständig lief. Einige wenige Fahrzeuge hatten Probleme mit der Türsteuerung. Als weitere Fehler wurden mit Einzelnennungen angegeben: Lenkhilfeaggregat, Luftpresser, Abgasnachbehandlung, Generator, Ölverlust. In der Kälteperiode Anfang Februar¹¹ kam es bei einigen Fahrzeugen teilweise zum Ausfall der Zusatzheizung. Der Dieselmotor schaltete dann oftmals nicht ab, weil die notwendige Betriebstemperatur nicht erreicht wurde. Für die übrigen Hybridbusse lagen keine Angaben für den Betrieb bei starkem Frost vor.

Vergleich zu konventionellem Dieselniss

Einen Überblick über die Bewertung der Hybridbusse im Vergleich zu konventionellen Dieselnissen gibt nachfolgende Abbildung.

¹¹ Die Temperaturen lagen über 2 Wochen ständig unter -15°C, die Tiefsttemperaturen unter -20°C.

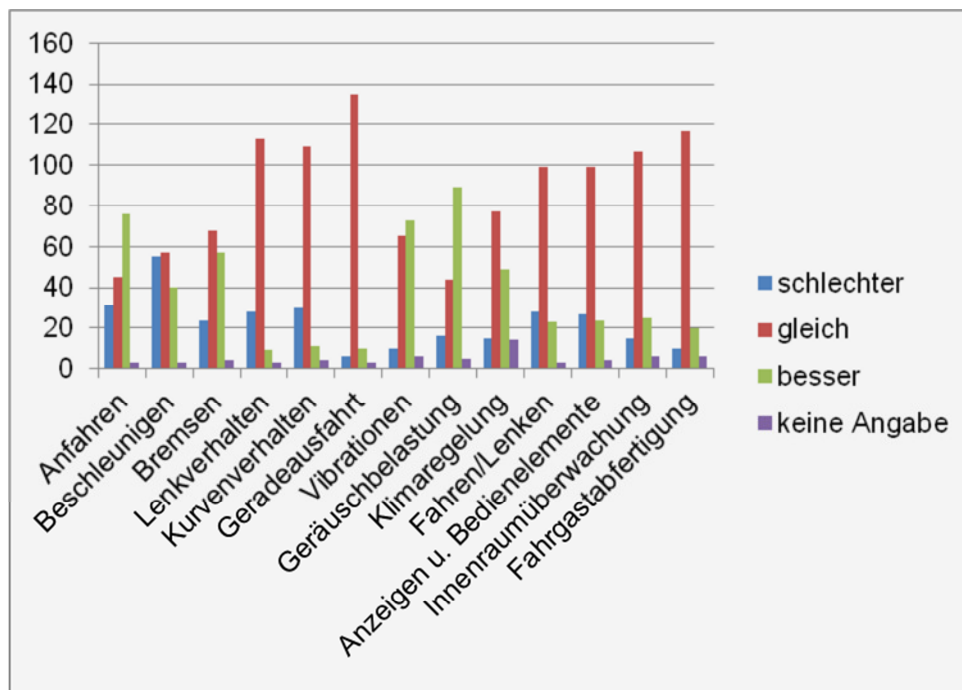


Abbildung 48: Gesamtbeurteilung der Hybridbusse (Anzahl der Nennungen)

Es ist ersichtlich, dass viele Fahrzeugeigenschaften als gleichwertig mit einem Dieselbus wahrgenommen werden. Als generell besser werden die Geräuschbelastung, das Anfahrverhalten und die auftretenden Vibrationen eingestuft. Das Beschleunigungsverhalten wird im Vergleich zum konventionellen Dieselbus zu beinahe gleichen Teilen als schlechter, gleich oder besser bewertet. Diese Einschätzung der Fahrer deckt sich mit den Ergebnissen der Akzeptanzuntersuchung im Rahmen der BMVBS-Studie. Lediglich die Einschätzungen zum Anfahren, Beschleunigen und Bremsen differieren hier. Die Fahrer, die im Rahmen der BMVBS-Studie befragt wurden, haben diesen Eigenschaften tendenziell eine bessere Benotung gegeben als den Dieselbussen. Das Anfahren wurde hier über 160 Mal (etwa von zwei Drittel der Fahrer) besser beurteilt und auch das Beschleunigen fanden 150 Fahrer beim Hybridbus besser als beim Dieselbus.

Anregungen zu Verbesserungen

Fahrzeugausstattung

Die Fahrer gaben sehr viele Anregungen und Vorschläge für die Weiterentwicklung der Hybridbusse. Diese bezogen sich häufig auf verbesserungswürdige Details der jeweiligen Fahrzeugausstattung, z. B. Anzeige- und Bedienelemente, Sichtverhältnisse (Spiegel, Kameras, Blendungen), Bewegungsraum, Ablagefächer und -flächen, Klimatisierung, Zugluft am Fahrerplatz, Sicherungssysteme für Fahrgäste, Verwendung von nicht klappernden Inneneinbauten usw. Allerdings ist zu berücksichtigen, dass es sich dabei größtenteils nicht um hybridspezifische Merkmale der Fahrzeuge handelt.

Antrieb

Zu den generellen Merkmalen von Hybridbussen, die der Verbesserung bedürfen, wurde vor allem auf ein besseres Beschleunigungsverhalten und die Vermeidung von Leis-

tungslücken beim Wechsel zwischen elektrischem und Dieselbetrieb hingewiesen. Gleiches gilt für den Bremskraftverlust beim Übergang zum elektrischen Fahren. Für bergige Strecken sollte die am Rad ankommende Leistung der Fahrzeuge erhöht werden. Das Fahren im elektrischen Betrieb sollte bis zu höheren Geschwindigkeiten (z. B. 40 – 50 km/h) und über längere Streckenabschnitte möglich sein. In diesem Zusammenhang wurde auch der Wunsch geäußert, die Speicherkapazität zu erhöhen und das Leergewicht des Fahrzeugs zu senken. Es wurde angeregt, wegen des Mehrgewichts das Fahrwerk eventuell härter abzustimmen, um das Einknicken in zügigen Kurvenfahrten zu minimieren. Das Abschalten des Dieselmotors sollte zusätzlich zur Automatik auch durch den Fahrer initiiert werden können. So könnte in Vorausschau auf den weiteren Linienverlauf und das Verkehrsgeschehen Kraftstoff gespart oder auch Abgas- und Lärmbelastungen im Umfeld vermieden werden.

Sicherheit & Komfort

Zur Erhöhung der Sicherheit der Passanten wurde die Einführung eines zusätzlichen akustischen Signals angeregt, da diese den geräuschlos fahrenden Bus häufig nicht bemerken. Da die Fahrzeuge im Vergleich zu Dieselnbussen einen erhöhten Heizölbedarf haben, sollten Größe und Zugänglichkeit des Heizöltanks auf ihre Tauglichkeit für Perioden starken Frostes überprüft werden. Die bei allen Bussen auftretenden Pfeifgeräusche sollten vermindert werden.

Aus den vielfältigen Angaben und Verbesserungsvorschlägen ist das Interesse der Fahrer für die Weiterentwicklung der Hybridtechnologie klar zu erkennen. In einigen der Schlussbemerkungen wird die Begeisterung dafür sogar deutlich ausgedrückt, z. B. so: „Ich bemühe mich noch stärker energieeffizient zu fahren. Es ist ein interessantes Arbeiten wenn man gerne sparsam fährt – ähnlich wie bei Fahrten mit Diesel und dem mobilen Kraftstoffverbrauchsanzeiger.“

Bewertung durch die Fahrgäste

Fahrgastbefragungen im Bus wurden im Rahmen dieses Projektes in Hannover, Lübeck, Freital und Freiberg durchgeführt. Zusätzlich fließen, wie oben bereits erwähnt, die Befragungsergebnisse aus Dresden und Leipzig ein. Insgesamt wurden 803 Fahrgäste befragt.

Assoziationen zu Hybridantriebstechnologie

Der überwiegenden Anzahl der Befragten (80 Prozent) war der Begriff „Hybridbus“ bekannt. Sie verbanden damit vor allem die Eigenschaften umweltschonend, kraftstoff- bzw. energiesparend, neue Technologie (Abbildung 49).

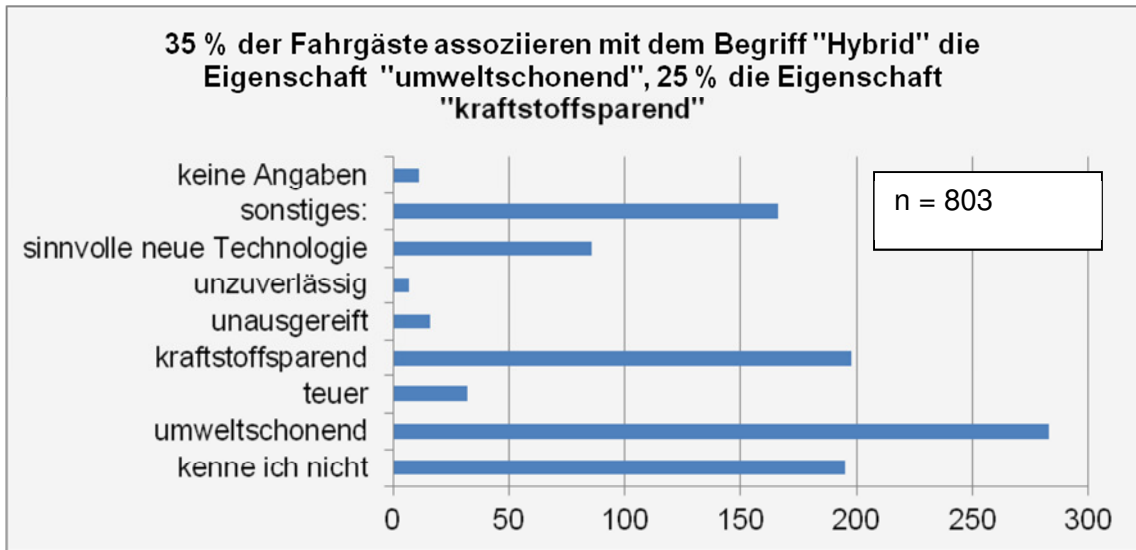


Abbildung 49: Assoziationen mit dem Begriff „Hybridbus“

Die Geräusche und das Fahrverhalten im Vergleich zum Dieselbus wurden von den meisten als leiser, gleichmäßiger und ruhiger beschrieben. Als störend wurden die Pfeifgeräusche (14 Prozent der Befragten und 47 Prozent der genannten besonderen Geräusche) empfunden. Auch beschrieb ein Zehntel der Befragten das eigentliche Motorgeräusch als lauter, besonders wenn diese in der Nähe des Motors saßen.

Die besondere Gestaltung der Fahrzeuge fiel vielen Fahrgästen positiv auf. Sie verbanden damit Begriffe wie Umwelt und Natur aber auch Eigenschaften wie modern, stromlinienförmig und schnittig.

Bis auf ganz wenige Ausnahmen standen die Fahrgäste der Einführung der Hybridbusse ausgesprochen aufgeschlossen gegenüber.

Bewertung durch Passanten

In Dresden, Leipzig und Lübeck wurden 318 Passanten an Haltestellen befragt. Die Fragen galten dem Begriffsverständnis und der Geräuscentwicklung der Hybridbusse im Außenbereich, letztere auch im Vergleich mit anderen Fahrzeugen im Straßenverkehr. Außerdem wurde die Akzeptanz hinsichtlich der besonderen Gestaltung der Fahrzeuge und der damit assoziierten Eigenschaften ermittelt.

Assoziationen zu Hybridantriebstechnologie

Der Begriff „Hybridbus“ war diesen Personen zum größten Teil (82 Prozent) bekannt und 66 Prozent von ihnen gaben an, schon einmal mit einem Hybridbus mitgefahren zu sein. Wie auch die Fahrgäste im Bus assoziierten die Passanten mit dem Begriff Hybridbus hauptsächlich die Eigenschaften umweltschonend, kraftstoffsparend und sinnvolle neue Technologie. Als weitere Eigenschaften wurden die leiseren Geräusche der Fahrzeuge und der Beitrag zur Verbesserung der Luft durch geringere Abgase genannt.

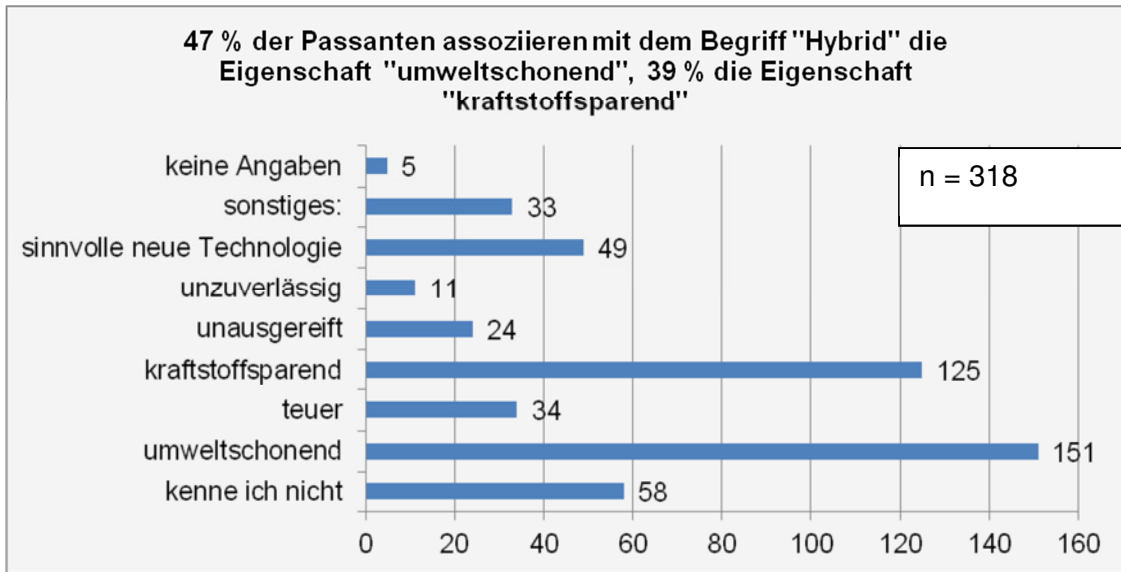


Abbildung 50: Assoziationen der Passanten mit dem Begriff „Hybridbus“

Die knappe Hälfte der Befragten empfand sich durch die Geräusche des Straßenverkehrs belästigt. Als hinsichtlich der Geräuscentwicklung am meisten störende Fahrzeuge wurden unter einer möglichen Auswahl zwischen Lkw, Bus, Kraftrad und Pkw die Lastkraftwagen am häufigsten angegeben, danach Bus, Kraftrad und Pkw mit geringer Abstufung untereinander. Den Außengeräuschen von Linienbussen im Allgemeinen wurde von den meisten eine mittlere Lautstärke zugeordnet. Hybridbusse wurden von zwei Dritteln der Befragten als leiser empfunden. Besondere Außengeräusche wurden von 23 Prozent der Befragten festgestellt. In der Beschreibung dieser Geräusche bestätigt sich das Bild aus den Fahrer- und Fahrgastbefragungen. Auch von den Passanten wurde Pfeifen am häufigsten genannt.

Rund 70 Prozent der Befragten war das besondere äußere Erscheinungsbild der Hybridbusse aufgefallen. Sie verbanden damit Begriffe wie freundlich, neu, modern, futuristisch, ähnlich wie Straßenbahn, Umwelt und Natur. Insgesamt gefiel den Passanten die Gestaltung gut. Kritisiert wurde, dass in einigen Fällen die Scheiben beklebt waren.

Die befragten Passanten bewerteten die Hybridbusse im Gesamtbild als positiv, hervorgehoben wurden die leiseren Geräusche und die geringere Abgasbelastung. Dies deckt sich mit den Einschätzungen, die auch während des Hybridbusprojektes der Modellregionen Elektromobilität des BMVBS von den Fahrgästen getroffen wurden. Vor allem das leisere Geräusch und die Assoziation zur Umweltfreundlichkeit spielten auch hier für die Fahrgäste und Passanten eine wichtige Rolle.

Fazit der Akzeptanzbefragungen

Sowohl Fahrer und Fahrerinnen als auch Fahrgäste und Passanten stehen der Einführung der Hybridtechnologie bei Linienbussen ausgesprochen positiv gegenüber. Aus den Antworten zu den gestellten Fragen geht das starke Interesse der Fahrer und Fahrerinnen an der weiteren Optimierung der Fahrzeuge sowohl hinsichtlich der Technologie, der Energiespareffekte als auch einer entsprechenden Einbeziehung in das Gesamtkonzept des Fahrerarbeitsplatzes hervor. Auch die Busfahrer, die im Rahmen der

BMVBS-Studie¹² befragt wurden, zeigten ähnliches Interesse und eine grundsätzliche Zufriedenheit mit den Hybridbussen.

Fahrgäste und Passanten begrüßten den Einsatz umweltfreundlicher und leiser Fahrzeuge. Einige Fahrgäste wiesen darauf hin, dass sich die Hybridbusse im Dauereinsatz auch als wirtschaftlich erweisen müssen. Weitere Hinweise gab es vor allem zur Verminderung der besonderen Geräusche, insbesondere des Pfeifens der Elektronik und lauter Lüftergeräusche.

5.2 Ermittlung der Kosten im Linienbetrieb

5.2.1 Zielsetzung und Vorgehensweise

Im Rahmen dieses Arbeitspakets werden die Kosten des Einsatzes von Hybridbussen differenziert bewertet und den entsprechenden Kosten von vergleichbaren Standardbussen mit Dieselantrieb (=Referenzbusse) gegenübergestellt.

Die Berechnung und Gegenüberstellung der jeweiligen Kosten pro Kilometer erfolgt

- für die am Förderprogramm beteiligten Betreiber
- differenziert nach Bustypen und Kostenarten
- unter Berücksichtigung der jeweiligen Betriebscharakteristiken.

Zur Klassifizierung der Betriebscharakteristiken wird auf die Systematik der UITP (SORT 1 bis 3) zurückgegriffen.

Die nach Betreibern differenzierten Kostendaten werden so verdichtet, dass sich für unterschiedliche Bustypen und Einsatzcharakteristiken übergreifende Aussagen zu den Kosten der Hybridtechnik im Vergleich zum Dieselseinsatz ableiten lassen.

5.2.2 Strukturierung der Kosten und Datengrundlagen

Die Strukturierung der Kosten umfasst die Entwicklung und Vorgabe einer einheitlichen Kostengliederung für konventionelle Busse und Hybridbusse. Dabei wird zunächst unterschieden zwischen

- fahrzeugbezogenen Kosten und
- systembedingten Zusatzkosten des Hybridbusbetriebs.

5.2.2.1 Fahrzeugbezogene Kosten

Kostenstruktur

Die fahrzeugbezogenen Kosten sowie deren wesentliche Einflussfaktoren werden im Folgenden dargestellt:

¹² http://www.now-gmbh.de/fileadmin/user_upload/RE-Mediathek/RE_Publikationen_MR/Busplattform-Abschlussbericht_fuer_NOW_Version2.pdf

A – Verbrauch Kraftstoff/Betriebsstoffe

Bezüglich des mengenmäßigen Kraftstoffverbrauchs sowohl der Hybridbusse als auch vergleichbarer, d.h. neuwertiger und umweltfreundlicher Dieselsebusse wird

- durch die Messungen auf dem Rollenprüfstand sowie
- die Verbrauchsmessungen im realen Betrieb

eine Datenbasis zur Verfügung gestellt, so dass hier eine entsprechende Bewertung erfolgen kann.

Im Hinblick auf den Kraftstoffverbrauch unter realen Einsatzbedingungen wäre im Übrigen ein Beobachtungszeitraum von 1 Jahr wünschenswert, da vor allem für den Winterbetrieb gegebenenfalls ein Aufschlag anzusetzen ist. Dies ist erfahrungsgemäß bei konventionellen Diesel-Bussen zu berücksichtigen, dürfte aber auch auf Hybridbusse zutreffen; der Einfluss auf den Verbrauchsunterschied zwischen Diesel- und Hybridbussen ist jedoch vermutlich relativ gering.

B – Versorgung

Bezüglich der Versorgungsvorgänge ist davon auszugehen, dass sich der Aufwand für Hybridbusse nicht von demjenigen für konventionelle Busse unterscheidet.

C – Instandhaltung

Wartung/Inspektion

Bezüglich der Wartungs- und Inspektionsarbeiten werden insbesondere durch die Vorgaben der Fahrzeughersteller Informationen zur Verfügung gestellt, um eine entsprechende Bewertung vorzunehmen.

Unfall, Vandalismus, Umbau etc.

Hier wird von keinen wesentlichen Veränderungen beim Einsatz von Hybridbussen ausgegangen.

Verschleißbedingte Reparaturen

Für eine empirische Analyse der Kosten verschleißbedingter Reparaturen ist der zur Verfügung stehende Prüf- bzw. Beobachtungszeitraum deutlich zu kurz. Bei „ausgereiften“ Fahrzeugen sind in den ersten Nutzungsjahren, abgesehen von den üblichen Wartungen und Inspektionen, einigen Garantiarbeiten und den gesetzlichen Prüfungen, keine nennenswerten Instandhaltungsaktivitäten zu erwarten. Die verschleißbedingten Ausfälle wesentlicher Fahrzeugkomponenten treten in Abhängigkeit von der Nutzungsintensität der Fahrzeuge typischerweise erst später auf. Dementsprechend ist erfahrungsgemäß mit deutlich steigenden Instandhaltungskosten über den Lebenszyklus eines Linienbusses zu rechnen.

Die folgende Abbildung zeigt dies an einem ausgewählten Beispiel für eine Dieselsebusflotte im Stadtverkehr:

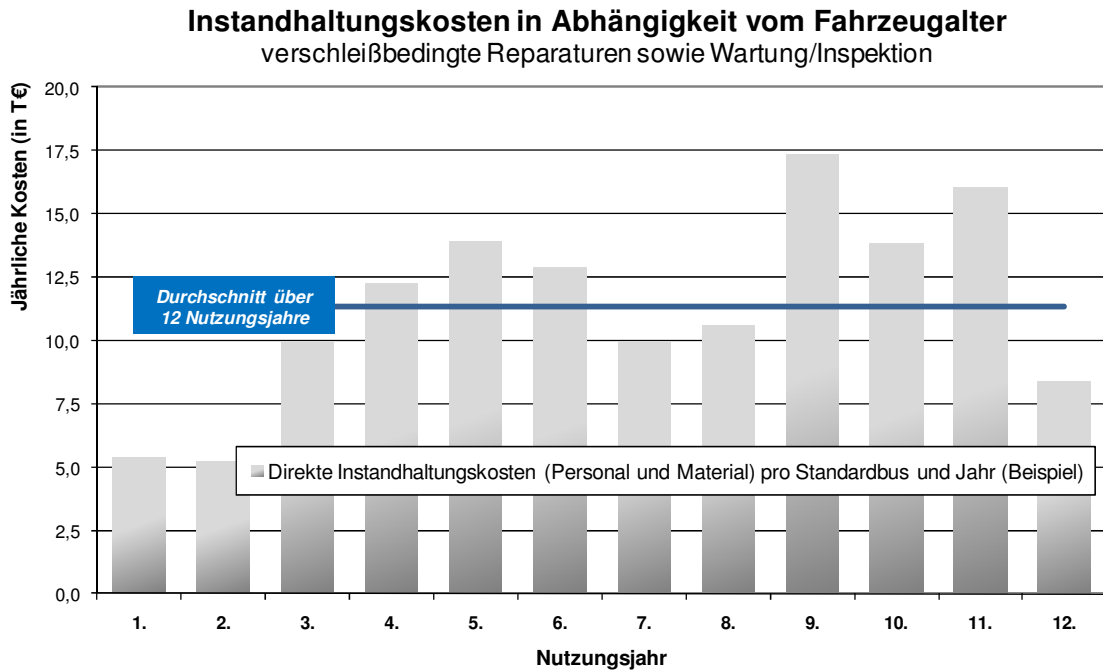


Abbildung 53: Entwicklung der Instandhaltungskosten über den Lebenszyklus (virtuelle Solo-Dieselbusflotte aller Teilnehmer im überwiegenden Stadtverkehr)

Die Problematik einer Prognose der Entwicklung der Kosten für verschleißbedingte Reparaturen trifft dabei nicht allein auf die neue Technologie der Hybridbusse zu, sondern auch für die letztlich als Vergleichsmaßstab heranzuziehenden modernen Dieselbusse: Auch hier liegen naturgemäß noch keine empirischen Daten bezüglich des Verschleißverhaltens über den gesamten Lebenszyklus vor. Diese Aussage gilt mit Blick auf mögliche qualitative Veränderungen grundsätzlich für jede neue Fahrzeuggeneration; darüber hinaus stellen insbesondere die Systeme und Komponenten zur Einhaltung der immer strengeren Emissionsgrenzwerte auch im Bereich der konventionellen Busse technische Innovationen dar.

Vor diesem Hintergrund ist es Ziel des Projekts, zunächst eine fundierte, durch die tatsächlichen Einsatzbedingungen der Teilnehmer geprägte Datenbasis im Hinblick auf die verschleißbedingten Instandhaltungskosten der heutigen Bestandsfahrzeuge als guten „Aufsetzpunkt“ für die dann notwendigen Modellierungen, Hochrechnungen und Abschätzungen zu schaffen

- sowohl im Hinblick auf das Verschleißverhalten der Hybridbusse
- wie auch der modernen Vergleichsfahrzeuge.

Es wird davon ausgegangen, dass die für Instandhaltung ermittelten Kosten grundsätzlich auf Neufahrzeuge übertragen werden können, wobei die Instandhaltungskosten moderner Abgasnachbehandlungssysteme bzw. hybridspezifischer Komponenten ergänzend zu berücksichtigen sind:

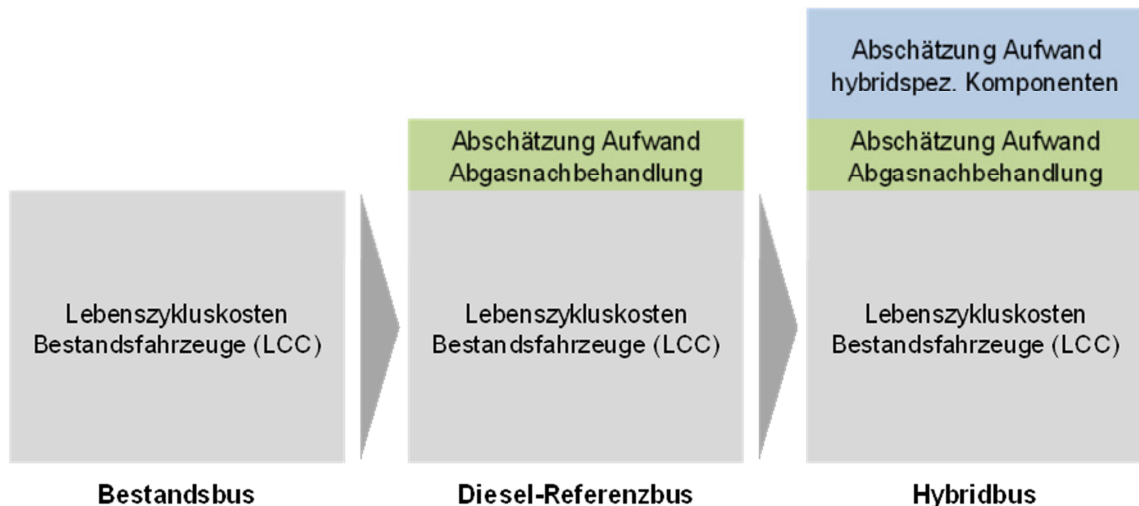


Abbildung 54: Vorgehen zur Kostenabschätzung Instandhaltung (schematisch)

D – Kapitaldienst

Zwar bestehen erhebliche Unsicherheiten bezüglich der Preisentwicklung für Hybridbusse bei zukünftigen größeren Serien, dies betrifft allerdings nicht die hier konkret zu bewertenden Fahrzeuge.

Dagegen ist die technisch-wirtschaftliche Nutzungsdauer als eine entscheidende Einflussgröße für die Vorhaltekosten (v.A. Kapitaldienste) pro Kilometer eng mit der Entwicklung der Kosten für die Instandhaltung und damit insbesondere der verschleißbedingten Reparaturen verknüpft, so dass sich die Unsicherheiten bezüglich der Entwicklung der verschleißbedingten Reparaturkosten indirekt auch auf die Vorhaltekosten auswirken. Dennoch wird aus heutiger Sicht von einer 12-jährigen Nutzungsdauer der Hybridbusse wie auch der konventionellen Referenzbusse bei einer mittleren Laufleistung von ca. 60 Tkm p.a. (Gesamtlaufleistung etwa 720 Tkm) ausgegangen.

Mit Unsicherheit behaftet ist auch die Entwicklung der Restwerte zum Zeitpunkt der Aussonderung der Hybridbusse bei den hier teilnehmenden Verkehrsunternehmen; aufgrund des faktischen „Vorseriencharakters“ dieser ersten Generation von Hybridbussen wird jedoch zunächst davon auszugehen sein, dass hier kein maßgeblicher Restwert mehr zu erzielen ist.

5.2.2.2 Systembedingte Zusatzkosten Hybridbus

Der Einsatz von Hybridbussen ist mit systembedingten Zusatzkosten verbunden, die in den Verkehrsunternehmen zusätzlich zu den Kosten des Einsatzes einer konventionellen Dieselflotte entstehen. Dies begründet sich in dem elektrischen Antriebsstrang mit den Komponenten Antrieb (Elektrotraktion) und Traktionsenergiespeicher. Die hier vorhandenen Bauelemente im Hochvoltbereich stellen spezifische Anforderungen an die Ausrüstung der Betriebshöfe, an Abläufe und Prozesse der Instandhaltung und an die Qualifikation des einzusetzenden Personals. Die Höhe dieser systembedingten Zusatzkosten hängt im Wesentlichen davon ab, ob die einzelnen Verkehrsunternehmen Wartungs- und Instandhaltungsarbeiten an ihren Hybridbussen in Eigenleitung vor-

nehmen, die über den Aufwand bei konventionellen Dieselnbussen hinausgehen, d. h. insbesondere, ob am hybriden Antriebsstrang (elektrische Traktion, Traktionsenergiespeicher) gearbeitet werden soll. Aufgrund der zu erwartenden höheren Ausfallrate zu Beginn der Systemeinführung muss zudem ein erhöhter Bedarf an Reservekilometern berücksichtigt werden.

Die systembedingten Zusatzkosten gliedern sich in folgende Kategorien:

- Fahrzeugreserve
- Werkstattausrüstung und Fahrzeugversorgungseinrichtungen
- Schulungen/Mitarbeiterqualifikation
- Ersatzteilverhaltung und Lagerraum

A – Fahrzeugreserve

Die Einführung einer vollständig neuen Technologie in der Busflotte erfordert das Vorhalten einer ausreichend groß dimensionierten Fahrzeugreserve. Das Auftreten sogenannter „Kinderkrankheiten“, die sich erst im praktischen Alltagsbetrieb zeigen, kann bei neuen Technologien nie restlos ausgeschlossen werden. Dabei sind durchaus Szenarien vorstellbar, in denen nicht nur ein einzelnes Fahrzeug ausfällt, sondern unter Umständen der gesamte Hybridbestand zeitweise aus dem Verkehr gezogen werden muss.

Grundsätzlich gilt jedoch auch für die Hybridbusse, dass nach einer Anfangsphase mit hohen Ausfallraten eine Phase mit hohen Verfügbarkeitsquoten folgen wird und die Ausfälle sich erst wieder allmählich mit zunehmendem Fahrzeualter mehren.

Für die Anfangsphase nach Inbetriebnahme, die wesentlich den Beobachtungszeitraum dieses Projektes prägt, sind jedoch hohe Ausfallraten und dementsprechend umfangreiche Fahrzeugreserven anzusetzen. Bei der Fahrzeugverfügbarkeit der neuen Hybridbusse ist ein Wert von 70 Prozent nicht zu pessimistisch, um auch ungünstige Szenarien ohne betriebliche Einschränkungen abbilden zu können. Bei einer angenommenen jährlichen Laufleistung der Fahrzeuge von 60.000 km bedeutet dies, dass Reservefahrten mit einem Volumen von bis zu 18.000 km jährlich je angeschafften Hybridbus einkalkuliert werden sollten.

Die nachfolgenden Betrachtungen gehen davon aus, dass diese Fahrzeugreserve durch Dieselfahrzeuge, nicht durch andere Hybridfahrzeuge sichergestellt wird. Diese Annahme begründet sich einerseits dadurch, dass systembedingte Ausfälle der gesamten Hybridbusflotte in der Anfangsphase nicht auszuschließen sind, andererseits ist es aus wirtschaftlichen und zum Teil auch betrieblichen Gründen nicht realistisch, von einer hybridbasierten Fahrzeugreserve auszugehen.

B – Werkstattausrüstung

Im Werkstattbereich sind aufgrund der im Fahrzeug verbauten Hochvolt-Elektrokomponenten zusätzliche Arbeitsmittel und Ausrüstungsgegenstände erforderlich, die bei einer reinen Dieselflotte nicht vorhanden sind, wenn wie eingangs beschrieben am Hybridantrieb gearbeitet werden soll. Ein Beispiel hierfür sind besonders isolierte Werkzeuge.

Aufgrund der bei Hybridbussen vorhandenen Dachaufbauten muss insbesondere eine absturzsichere Zugänglichkeit des Fahrzeugdaches gewährleistet werden, d. h. es muss ein Wartungsarbeitsplatz mit einem Dacharbeitsstand ausgerüstet werden. Ggf. sind weitere Einrichtungen wie Hubarbeitsbühnen oder zusätzliche Absturzsicherungen vorzusehen. Um die dachseitigen Komponenten (u. a. Energiespeicher) austauschen zu können, sind entsprechende Flurfördergeräte und passende Anschlagmittel vorzuhalten (z. B. Gabelstapler mit ausreichender Hubhöhe, Mobil- oder Deckenkräne).

Aus Gründen der Arbeitsorganisation oder Arbeitssicherheit kann es erforderlich werden, für Hochvoltarbeiten einen separaten Werkstattbereich einzurichten. Weiterhin muss beachtet werden, dass die in den Energiespeichern enthaltenen Stoffe als Gefahrgut zu behandeln sind, was besondere Anforderungen, etwa in den Bereichen Brandschutz (Löschmittel) oder Aufbewahrung/Lagerhaltung mit sich bringt.

Ebenfalls im Kontext der Werkstattausrüstung zu sehen sind ggf. notwendige Anpassungen der Wartungsinhalte und –zyklen, die von denen konventioneller Dieselfahrzeuge abweichen können. Auch die technische Überprüfung der Hybridfahrzeuge (z. B. Brems-, Abgasprüfung) kann Modifikationen an Abläufen oder an der Messtechnik erfordern. Gerade in der Anfangszeit nach Inbetriebnahme ist mit einem erhöhten Reparatur- und Wartungsaufkommen zu rechnen.

Zu bedenken ist weiterhin, dass bei der Außenreinigung bestimmte Vorkehrungen zum Schutz der elektrischen Dachaufbauten erforderlich sind. Beispielsweise ist nicht anzunehmen, dass eine automatische Reinigung mittels Drehbürsten im Bereich der Elektrokomponenten zulässig ist.

Zu den Fahrzeugversorgungseinrichtungen zählen technische Hilfsmittel, die das Fahrzeug mit Betriebs- und Hilfsstoffen ausstatten. Hierbei handelt es sich im Wesentlichen um die Betankungseinrichtungen für Dieseltreibstoff und ggf. AdBlue sowie in vielen Fällen zusätzlich für Heizöl (Innenraumheizung), sowie um die Bereitstellung von Motoröl, weiteren Schmierstoffen, Kühlmitteln oder Reinigungsmitteln für die Scheibenwaschanlage.

Es ist zu untersuchen, ob der Einsatz von Hybridbussen eine Modifikation bestehender Anlagen erfordert (z. B. Schutz vor Funkenflug) bzw. ob der elektrische Antriebsstrang zusätzliche Versorgungseinrichtungen benötigt.

C – Schulungen/Mitarbeiterqualifikation

Der Einsatz eines Fahrzeuges mit Elektrokomponenten im Hochvoltbereich erfordert speziell geschultes Personal. Die elektrotechnischen Ausbildungsinhalte von Kfz-Mechanikern –elektrikern und –Mechatronikern können diese Anforderungen nicht ab-

bilden, da sie sich auf den Bereich unterhalb der Hochvoltspannung (1.000 V) beschränken.

Daher sind für die Instandhaltung von Hybridbussen in ausreichendem Umfang Mitarbeiter als Hochvolt-Elektrofachkraft auszubilden, die Arbeiten unter Spannung durchführen bzw. Spannungsfreiheit am Fahrzeug herstellen können. Im Bereich der Elektrotechnik hat sich ein mehrstufiges System etabliert:

- Stufe 1: Nicht-elektrotechnische Arbeiten
- Stufe 2: Elektrotechnische Arbeiten im spannungslosen Zustand
- Stufe 3: Arbeiten unter Spannung

Hinsichtlich der Ausgangsqualifikation der Mitarbeiter wird unterschieden zwischen elektrotechnischen Laien, Personen mit elektrotechnischen Vorkenntnissen (z. B. abgeschlossene Lehre als Kfz-Mechaniker nach 1973, als Kfz-Elektriker oder Kfz-Mechatroniker) und Elektrofachkräften, z. B. Industrieelektroniker, Elektromonteure oder Elektroingenieure.

Es wird deutlich, dass nicht nur Personen, die technische Arbeiten an den Systemkomponenten des Hybridbusses vornehmen, eine Qualifizierung benötigen, sondern dass auch alle anderen Mitarbeiter, die einfache Instandhaltungsarbeiten durchführen, beispielsweise Fahrer oder Reinigungskräfte, eine grundlegende Unterweisung über den Umgang mit dem Hybridbus und seinen elektrotechnischen Besonderheiten erhalten müssen.

Generell ist zu untersuchen, welche alltäglichen Arbeiten an einem Hybridbus vorgenommen werden dürfen, ohne dass dafür bestimmte Systemzustände (insbesondere Spannungsfreiheit) durch speziell ausgebildetes Personal hergestellt werden müssen.

Es muss demnach untersucht werden, wie für die verschiedenen, in den Unternehmen vorhandenen Qualifikationsstufen durch entsprechende Schulungsmaßnahmen die verschiedenen Qualifizierungsstufen erreicht werden können. Weiterhin muss eine Bedarfsermittlung erfolgen, wie viele Mitarbeiter in den jeweiligen Stufen vorhanden sein müssen und welche Dienstleister die entsprechenden Qualifizierungsmaßnahmen anbieten (Fahrzeughersteller, externe Dienstleister).

In diesem Kontext ist zu überprüfen, ob die Hochvoltsensibilisierung in den einzelnen Qualifikationsstufen überhaupt fahrzeugunabhängig erfolgen können oder ob die zu vermittelnden Inhalte so eng an Fahrzeugspezifika gebunden sind, dass eine herstellerübergreifende Schulung nicht möglich ist.

Es ist zu erwarten, dass die großen Verkehrsunternehmen, die über einen Straßenbahnbetrieb verfügen, einen geringeren Schulungsbedarf aufweisen, da hier bereits elektrotechnisch ausgebildetes Fachpersonal für den Hochvoltbereich zur Verfügung steht.

D – Ersatzteilverhaltung und Lagerraum

Es ist davon auszugehen, dass die zusätzlichen elektrischen Komponenten auch die Vorhaltung spezieller Ersatz- und Verschleißteile sowie eventuell zusätzlicher Be-

Die Basis-, Ausstattungs- und Betriebsdaten der Bestandsbusse wurden – mit Ausnahme der Anschaffungskosten – von allen beteiligten Verkehrsunternehmen bereitgestellt. Auf dieser Grundlage erfolgte eine Auswahl von Fahrzeugen für eine „virtuelle“ Referenzflotte.

Die aus allen konventionellen Bestandsbussen ausgewählten Referenzbusse sind dabei nicht mit den Referenzbussen der Verbrauchs- und Emissionsmessungen identisch, sondern bilden eine unternehmensübergreifende „virtuelle“ Referenzflotte im Hinblick auf die Struktur der fahrzeugbezogenen Kosten in einem unterstellten 12-jährigen Lebenszyklus. Dabei ist zu berücksichtigen, dass selbst die beteiligten großen Unternehmen für sich alleine genommen – insbesondere im Bereich der Gelenkzüge – keine annähernd homogene Altersstruktur aufweisen.

Durch Bildung der „virtuellen“ Flotte wird im Übrigen auch eine hinreichende Anonymisierung der hier verwendeten Daten sichergestellt, die von den Verkehrsunternehmen als Voraussetzung für eine Herausgabe ihrer Kostendaten gefordert worden ist.

Die „virtuelle“ Referenzflotte aus insgesamt 120 Fahrzeugen (je 60 Solo- und Gelenkbusse) weist im Wesentlichen folgende Merkmale auf:

- Gleichmäßige Verteilung der Fahrzeuge über alle beteiligten Unternehmen (entsprechend der jeweiligen Flottengrößen).
- Sofern möglich Auswahl von jeweils 5 Solo- und 5 Gelenkbussen für jedes Erstzulassungsjahr im Zeitraum zwischen 1999 bis 2010. Somit wird das Spektrum von 12 Nutzungsjahren gleichmäßig über die „virtuelle“ Flotte abgedeckt.
- Repräsentativer Fahrzeugmix, d.h. die Zusammensetzung der „virtuellen“ Flotte entspricht hinsichtlich Hersteller und Typ etwa dem Fahrzeugmix aller angegebenen Fahrzeuge. Fahrzeughersteller und -typen, die nur sehr vereinzelt auftreten, wurden für die „virtuelle“ Flotte grundsätzlich nicht berücksichtigt.
- Repräsentativer Mix der Jahreslaufleistung, d.h. die jährliche Laufleistung der ausgewählten Fahrzeuge beträgt für ca. 70 Prozent der Fahrzeuge zwischen 50 Tkm und 70 Tkm. Je 15 Prozent der Fahrzeuge hatten 2010 eine höhere bzw. eine geringere Laufleistung.

Damit repräsentiert die virtuelle Flotte je 5 Solo- und 5 Gelenkbusse in einem Lebenszyklus von 12 Jahren mit ca. 60 Tkm p.a. je Fzg.

Die folgende Abbildung zeigt die zur Erfassung der allgemeinen Kostendaten der ausgewählten Referenzbusse verwendete Erfassungssystematik:

Fahrzeug		Eintrag: BbA	Eintrag: BbA	Eintrag: BbA
betriebl. Nr.		Eintrag: RhA	Eintrag: RhA	Eintrag: RhA
amtl. Kennz.				
Leistung (2010)		Eintrag:		
Einsatzcharakteristik		Eintrag:		
Laufleistung				
Summe Kosten (Buchungen 2010)				
Vorhaltekosten				
Kapitaldienst				
Abschreibung (ggf. Leasing)				
Zinsen				
Versicherungen				
Steuern				
Kraftstoff				
Menge [l]				
Kosten				
AdBlue				
Menge [l]				
Kosten				
Heizöl				
Menge [l]				
Kosten				
Schmierstoffe (Motoröl etc.)				
Sonstige Betriebsstoffe (Kühlmittel etc.)				
Instandhaltung	€	€	€	
Wartung/Insp., gesetzl. Untersuch.	€	€	€	
Personal				
Std.	Std	Std	Std	
Kosten	€	€	€	
Material (ohne Betriebsstoffe)	€	€	€	
Fremdleistung	€	€	€	
Sonstige	€	€	€	
verschleißbed. Rep. (inkl. Reifen)	€	€	€	
Personal				
Std.	Std	Std	Std	
Kosten	€	€	€	
Material	€	€	€	
Reifen	€	€	€	
Ersatzteile	€	€	€	
Fremdleistung	€	€	€	
Sonstige	€	€	€	
Unfall/Vandalismus	€	€	€	
Umbau/Modernisierung	€	€	€	
Versorgung (Betankung, Reinigung etc.)				
Std. (alle KOM gesamt)	Std			
Kosten (alle KOM gesamt)	€			
Fahrzeugsitzeneinsatz KOM				
Mo-Fr (Schule)	Stk			
Mo-Fr (Ferien)	Stk			
Sa	Stk			
So	Stk			

Abbildung 57: Erfassung allgemeiner Kostendaten der Referenzbusse (ausgewählte Bestandsbusse)

Die Daten zur „virtuellen“ Flotte wurden von allen beteiligten Verkehrsunternehmen soweit als möglich bereitgestellt. Im Wesentlichen ist hier Folgendes zu berücksichtigen:

- In Abstimmung mit den betroffenen Verkehrsunternehmen wurden im Einzelfall Daten ergänzt (z.B. Ermittlung von Arbeitsstunden anhand der gebuchten Eigenleistungskosten und überschlägig ermittelter Stundenverrechnungssätze), die mangels Speicherung entsprechender Daten im Unternehmen ursprünglich nicht bereitgestellt werden konnten.
- Diverse Fahrzeuge unterschiedlicher Verkehrsunternehmen wiesen auffällig hohe Kosten für verschleißbedingte Reparaturen auf. Sofern die Klärung ergab, dass hier versehentlich Kosten für die Beseitigung von Unfall-/Vandalismusschäden bzw. Umbau-/Modernisierungsmaßnahmen enthalten waren, wurde dies entsprechend korrigiert.
- Die Abgrenzung der Kosten zwischen den Kategorien Wartung/Inspektion/gesetzliche Untersuchungen einerseits und verschleißbedingte Reparaturen andererseits erfolgt in den beteiligten Verkehrsunternehmen sehr unterschiedlich (Zuordnung von Reparaturarbeiten aufgrund von Inspektionsergebnissen etc.). Aus diesem Grund wurden diese Kosten zusammengefasst; bei der späteren Kalkulation (vgl. Abschnitt 5.3) wurden differenzierte Standardansätze (Erfahrungswerte BbA für Solo- und Gelenkbusse) für reine Wartungs-/Inspektionsarbeiten und gesetzliche Untersuchungen ohne daraus resultierende Reparaturen angesetzt und die verbleibenden erhobenen Kosten den verschleißbedingten Reparaturen zugeordnet.
- Weil die Prozesse der einsatztäglichen Fahrzeugversorgung bei den beteiligten Verkehrsunternehmen sehr unterschiedlich organisiert sind (z.B. Durchführung

durch Werkstatt- oder Fahrpersonal), wäre die Ermittlung der Ist-Kosten für die am Projekt beteiligten Bereiche des Fahrzeugservice vielfach mit einem nicht vertretbaren Aufwand verbunden. Auch hier wurden bei der späteren Kalkulation (vgl. Abschnitt 5.3) differenzierte Standardansätze (Erfahrungswerte BbA für Solo- und Gelenkbusse) angesetzt.

Die dritte Stufe der Datenerfassung erfolgte überwiegend nicht formulargestützt, sondern in separaten Gesprächen mit den einzelnen Verkehrsunternehmen bzw. Fahrzeugherstellern. Dabei wurden folgende Angaben erhoben:

- Erfahrungen im Hinblick auf die Lebensdauern bis zu einer grundhaften Revision bzw. Austausch von Motor, Getriebe und Antriebsstrang beim konventionellen Dieselbus und üblicherweise anzusetzender Aufwand für entsprechende Maßnahmen bzw. Angaben, inwieweit entsprechende Maßnahmen an den Fahrzeugen der „virtuellen“ Flotte in den erhobenen Daten des Jahres 2010 enthalten sind.
- Bisherige Erfahrungswerte im Hinblick auf Wartungsaufwand, Lebensdauer und Kosten des Austauschs der Komponenten zur Abgasnachbehandlung bei modernen Dieseln (Euro 5, EEV)
- Aufnahme der von den Fahrzeugherstellern vorgesehenen Wartungs-/Inspektionsprogramme für die hybridspezifischen Komponenten (Steuerungen, Leistungselektronik, Elektromaschinen, Energiespeicher etc.) einschließlich des dafür veranschlagten Zeitbedarfs und Materialaufwands
- Angaben der Fahrzeughersteller zu den erwarteten Lebensdauern der wesentlichen hybridspezifischen Komponenten und den Kosten entsprechender Austauschaggregate

Darüber hinaus wurden Erfahrungen aus dem Betrieb von Oberleitungsbussen einbezogen, die mit Ausnahme der Energiespeicher ähnliche Aggregate aufweisen wie die hybridspezifischen Komponenten der Hybridbusse.

Aufgrund der zugesagten Anonymisierung, die von den Beteiligten teilweise als Voraussetzung für eine Zuarbeit entsprechender Angaben gefordert worden ist, sind die erhobenen Daten nicht im Einzelnen beigefügt; zusammenfassend lassen sich folgende Schlussfolgerungen ziehen:

- Überwiegend entspricht die Lebensdauer von Motor, Getriebe und Antriebsstrang der angestrebten Nutzungsdauer der Fahrzeuge, d.h. die je nach Topographie, Straßenzustand etc. unterschiedliche Ausfallrate, die eine grundhafte Revision bzw. Austausch dieser Komponenten erfordert, ist im Mittel relativ gering.
Diese Erfahrungen werden durch die vorliegenden Daten der „virtuellen“ Flotte gestützt, wo entsprechende Großreparaturen nur in geringem Umfang (Motor: 1 Fall, Getriebe: 2 Fälle) enthalten sind. Da sich allerdings die Ausfälle dieser Komponenten typischerweise in bestimmten Nutzungsjahren häufen, ist die Stichprobe der „virtuellen“ Flotte mit je 5 Solo- und Gelenkbussen pro Jahr zu klein, um daraus die Ausfallraten für einzelne Komponenten valide zu ermitteln.

- Im Hinblick auf den Instandhaltungsaufwand für die Komponenten der Abgasnachbehandlung (insbesondere CRT-Filter zur Partikelreduktion) gehen die bisherigen Erfahrungen der Verkehrsunternehmen sehr weit auseinander: Während teilweise die Selbstreinigung der Filter unzureichend gewesen ist, was einen erheblichen Mehraufwand bedeutet, sehen andere Betreiber diese Komponenten als unproblematisch an. Neuere Filter aus Sintermetall scheinen tendenziell weniger instandhaltungsintensiv zu sein als die erste Generation von Filtern auf Keramikbasis.

Auch bezüglich der SCR-Technik zur Stickoxidreduktion wird teilweise von Problemen (verstopfte Leitungen und Einspritzdüsen, defekte Pumpen etc.) berichtet. Insgesamt liegen hier bei den beteiligten Verkehrsunternehmen noch deutlich weniger Erfahrungen vor als für Partikelfilter, zumal auch andere technische Lösungen zur Einhaltung der Grenzwerte existieren.

- Nach Angaben der Hersteller ist der mittlere jährliche Wartungsaufwand für die hybridspezifischen Komponenten mit einem zusätzlichen Zeitbedarf von 3,5-5,0 Std. p.a. und zusätzlichen Materialkosten von max. ca. 100 € p.a. anzusetzen.
- Nach Angaben der Hersteller sind die Hauptbaugruppen des Hybridantriebs (einschließlich Dieselmotor und Supercap-Energiespeicher) grundsätzlich so ausgelegt, dass während der üblichen Nutzungsdauer der Fahrzeuge eine grundlegende Revision bzw. Austausch im Regelfall nicht notwendig sein sollte. Dennoch wird seitens der Hersteller erwartet, dass sich auch hier bestimmte Ausfallraten ergeben werden, belastbare Erfahrungswerte liegen dazu naturgemäß bislang noch nicht vor.

Eine Ausnahme bilden Energiespeicher auf Basis von Nickel-Metallhydrid-Akkumulatoren (NiMH): Hier wird für eine 12-jährige Fahrzeugnutzungsdauer ein einmaliger Austausch des Energiespeichers mit Kosten von z.Zt. etwa 36 T€ erwartet.

- Die Erfahrungen beim Betrieb von Oberleitungsbussen stützen die Einschätzung, dass für die hybridspezifischen Komponenten (ohne Energiespeicher) bei ausreichender Dimensionierung grundsätzlich von relativ geringen Ausfallraten ausgegangen werden kann.

Während die Anschaffungskosten der Hybridbusse zur Berechnung der Kapitaldienste von den Verkehrsunternehmen bereitgestellt wurden, werden für den Kraftstoffverbrauch der Diesel-Referenzbusse die im Rahmen dieses Projekts ermittelten Ergebnisse angesetzt; für die Hybridbusse wird eine Verbrauchsreduzierung um 20 Prozent unterstellt.

5.2.3 Kostenanalyse und Ergebnisse

5.2.3.1 Fahrzeugbezogene Kosten

A – Instandhaltung und Versorgung Diesel-Referenzbusse

Bei der Analyse der „virtuellen“ Flotte im Hinblick auf die Instandhaltungskosten wurden folgende Annahmen zugrunde gelegt:

- Umrechnung des Fahrzeugbestands der virtuellen Flotte in Rechnungswagen (RWg) gem. VDV-Schrift 881, allerdings ohne Berücksichtigung des Altersfaktors.
Die vom Verband Deutscher Verkehrsunternehmen herausgegebene VDV-Schrift 881 (05/2006) beschreibt ein Verfahren zur Ermittlung von Personal-Kennzahlen für die Instandhaltung und Bereitstellung von Linienbussen. Dabei werden unterschiedliche Fahrzeuggrößen, Laufleistungen, Reisegeschwindigkeiten, Fahrzeugalter und Fahrzeugausstattungen über Zu- und Abschlagsfaktoren harmonisiert, die im sogenannten „Rechnungswagen“ als Bewertungsgröße zusammengefasst werden.
- Nach Solo- und Gelenkbussen getrennte Zuordnung von Personaleinsatz und Materialkosten für die „virtuelle“ Flotte im Jahr 2010, gemäß VDV-Schrift 881 zunächst ohne Reifendienst, Unfall-/Vandalismusreparaturen und Umbau-/Modernisierungsmaßnahmen.
- Annahmen für die Zuordnung von Fremdleistungskosten zur Berücksichtigung fremdvergebener Leistungen:
 - 50 Prozent Materialkostenanteil
 - 50 Prozent Personalkostenanteil
 - Umrechnung des Personalkostenanteils in Stunden mit einem durchschnittlichen Verrechnungssatz von 65 €/Std.

Den sich ergebenden Personal- und Materialeinsatz für die Instandhaltung der „virtuellen“ Flotte in Abhängigkeit vom Fahrzeugalter einschließlich der sich aus der Stichprobe ergebenden Regressionsfunktionen zeigen die folgenden Abbildungen:

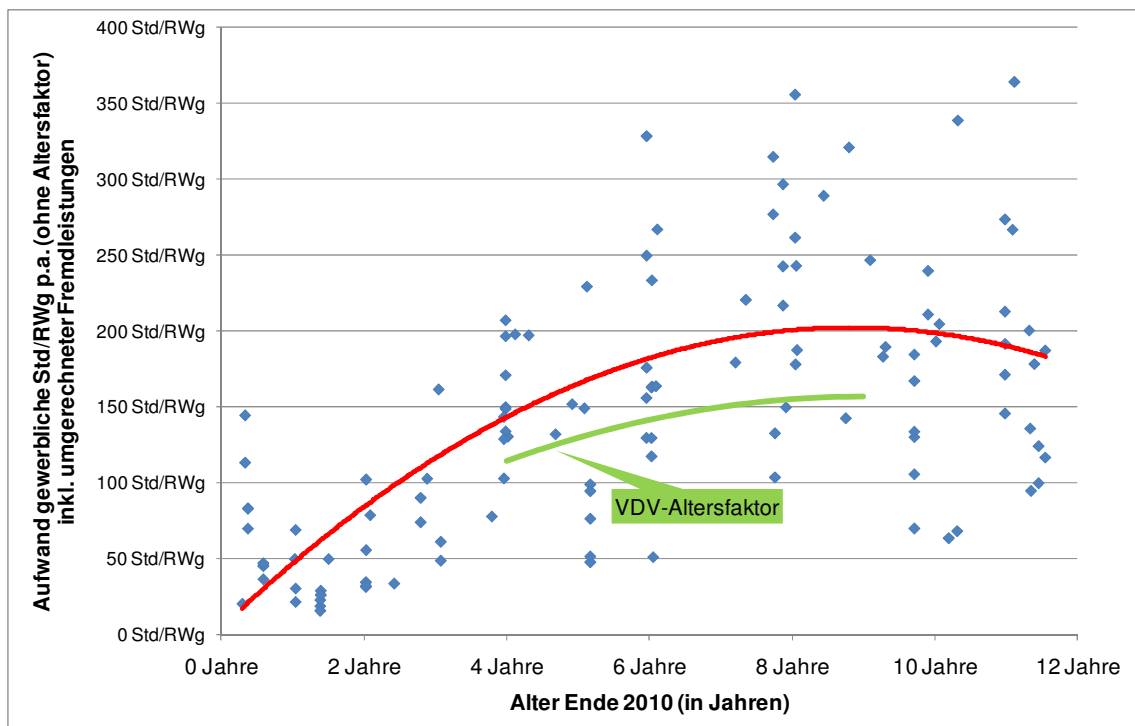


Abbildung 58: Personaleinsatz in Abhängigkeit vom Fahrzeugalter („virtuelle“ Flotte)

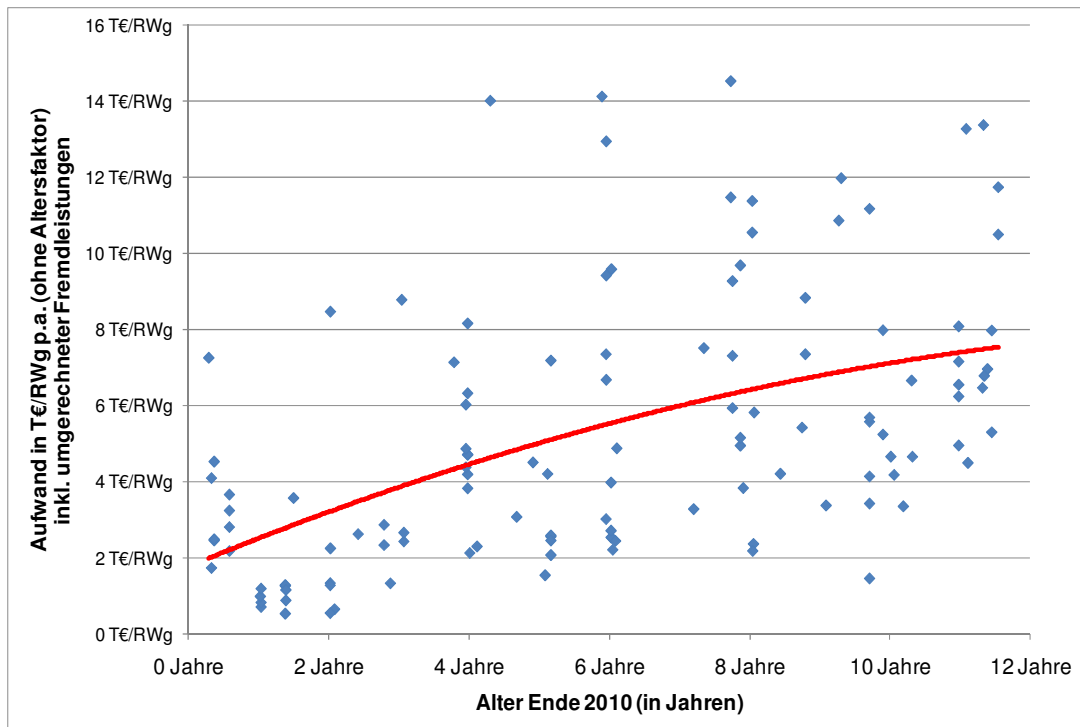


Abbildung 59: Materialeinsatz in Abhängigkeit vom Fahrzeugalter („virtuelle“ Flotte)

Aus der Analyse der Daten lassen sich folgende Schlussfolgerungen ziehen:

- Der VDV-Umrechnungsfaktor Fahrzeuggröße für den Personaleinsatz am Niederflur-Gelenkbus von 1,3 im Verhältnis zum Niederflur Solobus (1,0) wird durch die „virtuelle“ Flotte bestätigt.
- Für die Materialkosten ergibt sich aus der „virtuellen“ Flotte dagegen ein Umrechnungsfaktor für den Niederflur-Gelenkbus von 1,65 im Verhältnis zum Niederflur-Solobus.
- Der Kurvenverlauf für den VDV-Faktor Durchschnittsalter zur Abschätzung des Personaleinsatzes wird durch die „virtuelle“ Flotte bestätigt.
Das Niveau des Personaleinsatzes liegt im Mittel allerdings ca. 20 Prozent über dem VDV-Basiszielwert, wobei tendenziell einige Unternehmen über und andere Unternehmen auf oder leicht unter dem Zielwert liegen. Hier ist einschränkend zu beachten, dass einerseits z.B. unterschiedliche Belastungen der Fahrzeuge durch die Topographie nicht berücksichtigt werden.
- Durch die Auswertung wird der in der VDV-Schrift 881 auf ein Alter von 4 bis 9 Jahren beschränkte Kurvenverlauf auf die komplette Spanne einer Nutzungsdauer von 12 Jahren erweitert.
- Aus der „virtuellen“ Flotte wurde ein entsprechender Altersfaktor zur Abschätzung der jeweiligen Materialkosten ermittelt. Im Verhältnis zum Personaleinsatz ergibt sich ein stärker linearer Kurvenverlauf.

Auf dieser Basis werden zur Ableitung von Referenzwerten für die Instandhaltungskosten moderner Dieselbusse im Lebenszyklus folgende Ansätze gewählt:

- Es wird ein typischer Ausstattungsstandard moderner ÖPNV-Busse unterstellt:

Tabelle 15: Ausstattungsstandard und Gewichtungsfaktoren für moderne Dieselbusse

	Gewichtung	
	Pers.	Mat.
Kommunikationsanlage	0,1	
Fahrkartenverkaufssysteme	0,03	
Fahrtziel- und Haltestellenanzeige	0,04	
Fahrgastzählsysteme	-	
Videoüberwachung	0,01	
elektr. Einstiegshilfe	-	
Vollklimatisierung	-	
Aufdachklimageräte (1 Stück)	0,04	
Zusätzliche Fahrgasttür	-	
Abgasnachbehandlungssysteme	0,03	0,17 *)

*) s.u.

- Wegen der für Personal- und Materialeinsatz unterschiedlichen Bewertungsfaktoren im Hinblick auf Fahrzeuggröße und -alter ist zur Ableitung der gesamten Instandhaltungskosten jeweils
 - ein Rechnungswagen Personal (RWg. (P)) und
 - ein Rechnungswagen Material (Rwg. (M)) zu ermitteln.
- Es wird davon ausgegangen, dass die übrigen Faktoren in beiden Fällen gemäß der VDV-Schrift 881 verwendet werden können.
- Als Reisegeschwindigkeit wird der jeweilige nominelle Durchschnitt der SORT-Zyklen unterstellt:

Tabelle 16: nominelle durchschnittliche Reisegeschwindigkeit der SORT-Zyklen und des Braunschweig-Zyklus

SORT 1	SORT 2	SORT 3	BS-Zyklus
12,6 km/h	18,6 km/h	26,3 km/h	22,5 km/h

- Die Kosten der gewerblichen Eigenleistung für die Instandhaltung sind für 2010 mit einem mittleren Verrechnungssatz der Teilnehmer von 42 €/Std zu bewerten.
- Die Kosten für Unfall-/Vandalismusreparaturen, Umbau-/ Modernisierungsmaßnahmen und Reifendienst fließen altersunabhängig mit den durch die Analyse der virtuellen Flotte ermittelten Werten zusätzlich ein:

Tabelle 17: Kostenansätze für Unfall/Vandalismus, Umbau/Modernisierung und Reifen dienst

Unfall/Vandalismus: durchschnittlicher Aufwand im Laufe der Nutzungsdauer				
	SORT 1	SORT 2	SORT 3	BS-Zyklus
Solobus	21.000 €	17.000 €	14.000 €	15.000 €
Gelenkbus	29.000 €	24.000 €	20.000 €	21.000 €

Umbau/Modernisierung: durchschnittlicher Aufwand im Laufe der Nutzungsdauer				
	SORT 1	SORT 2	SORT 3	BS-Zyklus
alle Busse	2.900 €	2.900 €	2.900 €	2.900 €

Reifendienst				
	SORT 1	SORT 2	SORT 3	BS-Zyklus
Solobus	0,023 €/km	0,020 €/km	0,017 €/km	0,018 €/km
Gelenkbus	0,031 €/km	0,027 €/km	0,023 €/km	0,025 €/km

- Die Kosten der Fahrzeugversorgung konnten vielfach nicht angegeben werden. Hier werden – wie auch für die Fahrzeugversicherung – Erfahrungswerte aus dem BbA-Datenfundus angesetzt. Diese gehen von durchschnittlich 2 Außenwäschen pro Woche aus, wobei die Kosten der Waschanlage der Betriebshofinfrastruktur zugerechnet werden und somit hier nicht einfließen:

Tabelle 18: Kostenansätze für Fahrzeugversorgung und Versicherung

Versorgungsvorgänge pro Jahr				
	SORT 1	SORT 2	SORT 3	BS-Zyklus
alle Busse	308 Stk	302 Stk	248 Stk	275 Stk

Aufwand Versorgung/Innenreinigung		
	Solo	Gelenk
Zeitbedarf pro Vorgang	9 Min	12 Min
pauschaler Aufschlag *)	10%	
Kosten Innenreinigung	1.500 € p.a.	2.100 € p.a.

*) z.B. für mehrmalige Ausfahrten pro Einsatztag

Personalkosten Mitarbeiter Fahrzeugversorgung	
einheitlich	35,00 €/Std

Versicherung		
	Solobus	Gelenkbus
	0,040 €/km	0,060 €/km

- Für die Komponenten der Abgasnachbehandlung moderner Dieselsebusse wurde anhand der unterschiedlichen Erfahrungen verschiedener Betreiber ein mittlerer Aufwand von ca. 4 Std p.a. und ca. 800 € Materialkosten abgeschätzt:

Tabelle 19: Instandhaltungsaufwand für die Komponenten der Abgasnachbehandlung (DPF)

CRT-Filter	Personal	Material	Fremdl.
ca. 6. Jahr Tausch	4,0 Std	8.000 €	0 €
ca. 3./9. Jahr Reinigung	4,0 Std	100 €	1.500 €
ca. 4x pro Jahr Staudruckprüfung	0,25 Std	0 €	0 €
Gesamtaufwand in 12 Jahren (vor Umrechnung FL)	24,0 Std	8.200 €	3.000 €
Aufteilung Fremdleistung	23,1 Std	1.500 €	
Gesamtaufwand in 12 Jahren (nach Umrechnung FL)	47,1 Std	9.700 €	
pro Jahr	3,9 Std	808 €	
Zuschlag für RWg (P) (158 Std = 1 RWg)	0,03		
Zuschlag für RWg (M) (4.750 € = 1 RWg)		0,17	

Demzufolge erscheint der in der VDV-Schrift 881 angesetzte Zuschlag von 0,03 für den Personalbedarf bei Abgasnachbehandlungssystemen angemessen.

Für den Rechnungswagen Material wird dagegen ein Ausstattungszuschlag von 0,17 veranschlagt.

Mit den gewählten Ansätzen ergeben sich für die Instandhaltung und Versorgung moderner Diesel-Referenzbusse im Lebenszyklus die folgenden fahrzeugbezogenen Kostenwerte:

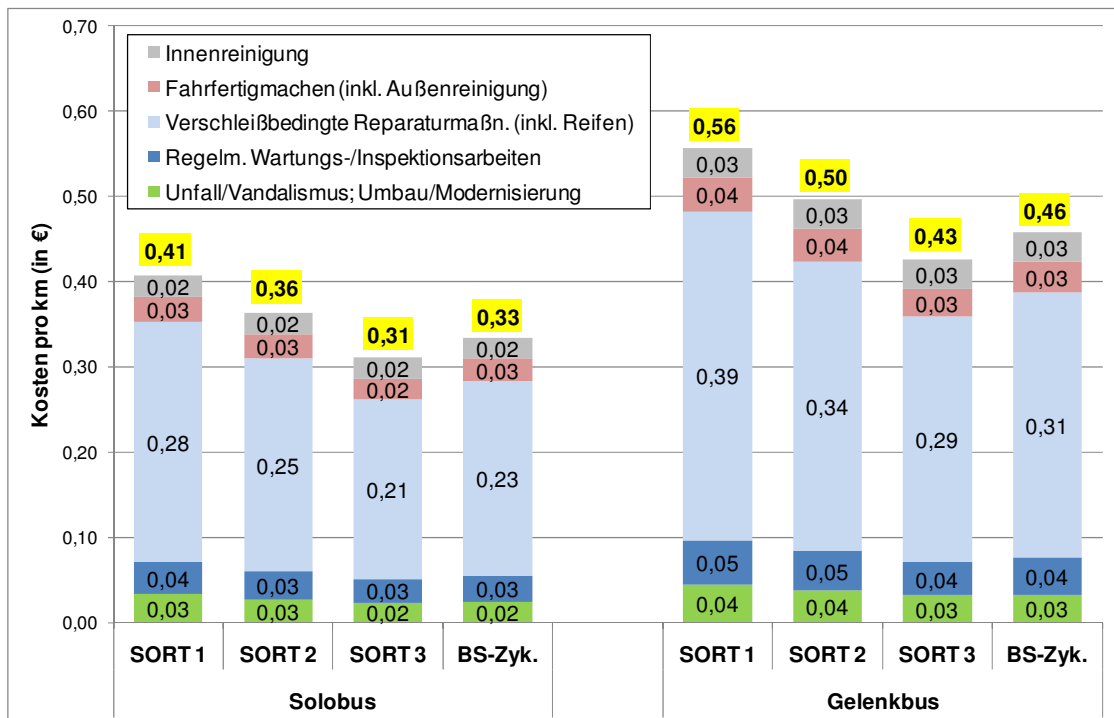


Abbildung 60: Kosten für Instandhaltung und Versorgung moderner Diesel-Referenzbusse

B – Kraftstoffverbrauch und Kapitaldienst Diesel-Referenzbusse

Als Kraftstoffverbrauch wurden die Verbräuche vom Rollenprüfstand zugrunde gelegt (s. Übersicht Kapitel 4.1.6).

Der hier zugrunde gelegte Kraftstoffpreis wurde aus den Daten der „virtuellen Flotte“ für 2010 abgeleitet und betrug im Mittel 1,00 € pro Liter (exkl. Mehrwertsteuer, inkl. Ökosteuernerstattung). In gleicher Weise wurden die Kosten der übrigen Verbrauchsstoffe ermittelt; diese sind aber von insgesamt untergeordneter Bedeutung.

Für den Kapitaldienst wird eine lineare Abschreibung über 12 Jahre sowie eine Verzinsung des durchschnittlich gebundenen Kapitals (häftiger Anschaffungswert) von 4,5 Prozent kalkuliert.

Dabei werden zunächst folgende Anschaffungskosten zugrunde gelegt:

- Solobus: 200.000 €
- Gelenkbus: 300.000 €

Als Restwert werden 8,5 Prozent der Anschaffungskosten angenommen.

C – Fahrzeugbezogene Gesamtkosten Diesel-Referenzbus (SORT 1-3 u. BS-Zyklus)

Zusammenfassend ergeben sich für die Diesel-Referenzbusse insgesamt folgende fahrzeugbezogene Kosten:

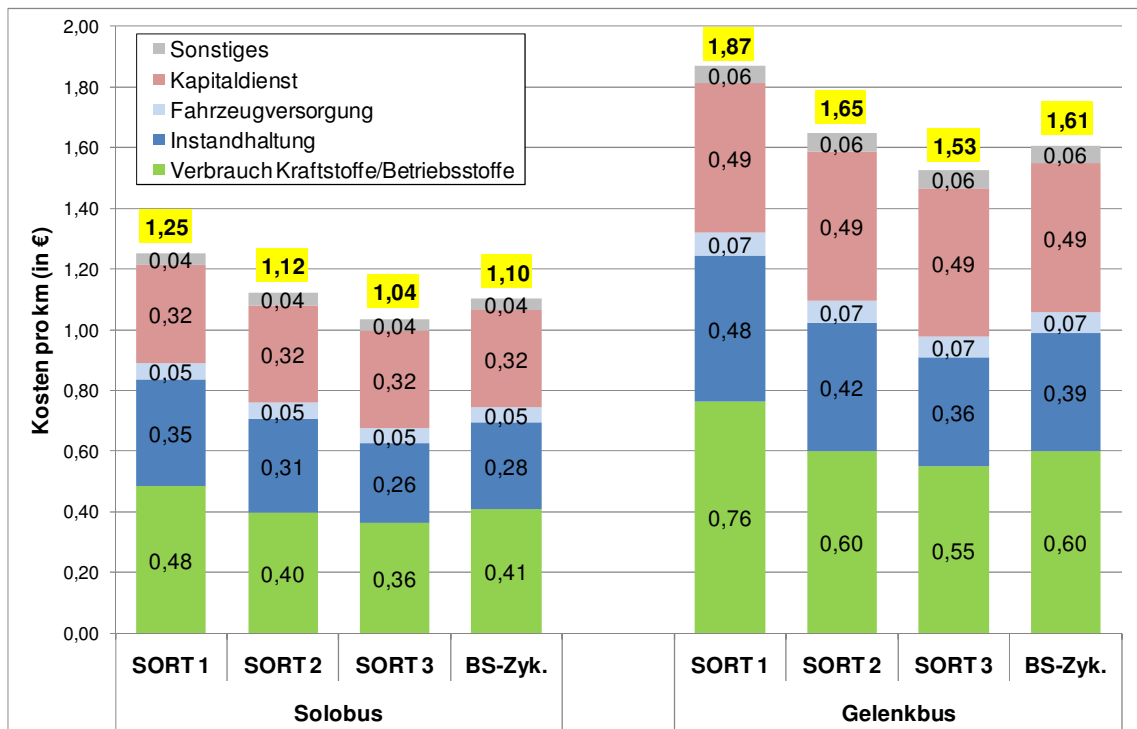


Abbildung 61: Fahrzeugbezogene Gesamtkosten moderner Diesel-Referenzbusse

D – Kostenunterschiede Hybridbus – Diesel-Referenzbus

Für den Bereich der Instandhaltung und Versorgung liegen zunächst folgende Informationen vor (vgl. Abschnitt A):

- Nach Angaben der Hersteller ist der mittlere jährliche Wartungsaufwand für die hybridspezifischen Komponenten mit einem zusätzlichen Zeitbedarf von 3,5-5,0 Std. p.a. und zusätzlichen Materialkosten von max. ca. 100 € p.a. anzusetzen.
- Nach Angaben der Hersteller sind die Hauptbaugruppen des Hybridantriebs (einschließlich Dieselmotor und Supercap-Energiespeicher) grundsätzlich so ausgelegt, dass während der üblichen Nutzungsdauer der Fahrzeuge eine grundlegende Revision bzw. Austausch im Regelfall nicht notwendig sein sollte. Trotzdem wird auch seitens der Hersteller erwartet, dass sich auch hier dennoch bestimmte Ausfallraten ergeben werden.
Eine Ausnahme bilden Energiespeicher auf Basis von Nickel-Metallhydrid-Akkumulatoren (NiMH): Hier wird für eine 12-jährige Fahrzeugnutzungsdauer ein einmaliger Austausch des Energiespeichers mit Kosten von z.Zt. etwa 36 T€ erwartet.

Darüber hinaus ist Folgendes zu berücksichtigen:

- Erfahrungsgemäß summieren sich für Bestandsbusse die Instandhaltungskosten über die Nutzungsdauer typischerweise auf ca. 100 Prozent des Anschaffungswertes („kumulierte Instandhaltungsquote“). Es ist davon auszugehen, dass sich auch für den Hybridantrieb eine am Anschaffungswert der zusätzlichen spezifischen Komponenten orientierte „kumulierte Instandhaltungsquote“ ergibt.
Nicht zuletzt aus den Erfahrungen mit Oberleitungsbussen wird allerdings die „kumulierte Instandhaltungsquote“ für hybridspezifische Komponenten – mit Ausnahme von Akkumulatoren – als vergleichsweise gering eingeschätzt; deshalb werden hier zunächst nur 10 Prozent der Anschaffungsmehrkosten der Hybridfahrzeuge gegenüber vergleichbaren Diesel-Referenzbussen angesetzt:

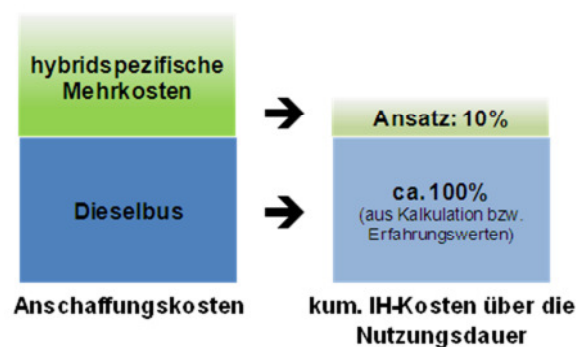


Abbildung 62: Ansatz kumulierte Instandhaltungsquote

Spezifische Erfahrungen werden allerdings naturgemäß erst in einigen Jahren vorliegen.

- Als Basis für die Kalkulation der Instandhaltungskosten kommt die Differenz der Anschaffungswerte zwischen Hybridbus und jeweiligem Referenzfahrzeug zum Tragen.
- Einsparungen durch eine Schonung der Betriebsbremse im Zuge der Rekuperation sind u.E. nicht zu erwarten, da mit dem Retarder auch im Diesel-Referenzbus eine verschleißfreie Bremsenrichtung mit vergleichbarem Einsatzbereich zur Verfügung steht.
- Für die Versorgungsvorgänge der Hybridbusse wird kein zusätzlicher Aufwand eingerechnet.

Aufgrund der sehr heterogenen Ergebnisse der Verbrauchsdaten aus dem Flotteneinsatz, wie in Kapitel 5.1.2 dargelegt, basieren die weiteren Darstellungen auf den am ehesten reproduzierbaren Rollenprüfstandsdaten für die Diesel-Referenzfahrzeuge (s. Übersicht Kapitel 4.1.6) und einer Verbrauchsreduzierung der Hybridbusse von einheitlich 20 Prozent, die vor dem Hintergrund der Praxismessungen aus heutiger Sicht allerdings das Maximum an erreichbaren Einsparungen repräsentieren.

Im Hinblick auf die Anschaffungswerte der Fahrzeuge ist zu berücksichtigen, dass neben Ausstattungsunterschieden auch z.B. unterschiedliche Gewährleistungszeiträume, Servicevereinbarungen, enthaltene Schulungsprogramme etc. zu unterschiedlichen Konditionen für die einzelnen Fahrzeuge innerhalb einer Modellreihe führen können. Für die Anschaffungswerte (ohne Förderung) der Hybridbusse werden hier folgende Größenordnungen angesetzt:

- Hybrid-Solobus: 350.000 €
- Hybrid-Gelenkbus: 520.000 €

Dabei wird für die aktuelle erste Generation der Serien-Hybridbusse kein Restwert nach Ablauf der Nutzungsdauer von 12 Jahren angenommen.

Die folgende Abbildung stellt die Kostenunterschiede für Kapitaldienst und Kraftstoffverbrauch zwischen den Hybridbussen und modernen Diesel-Referenzbussen gegenüber:

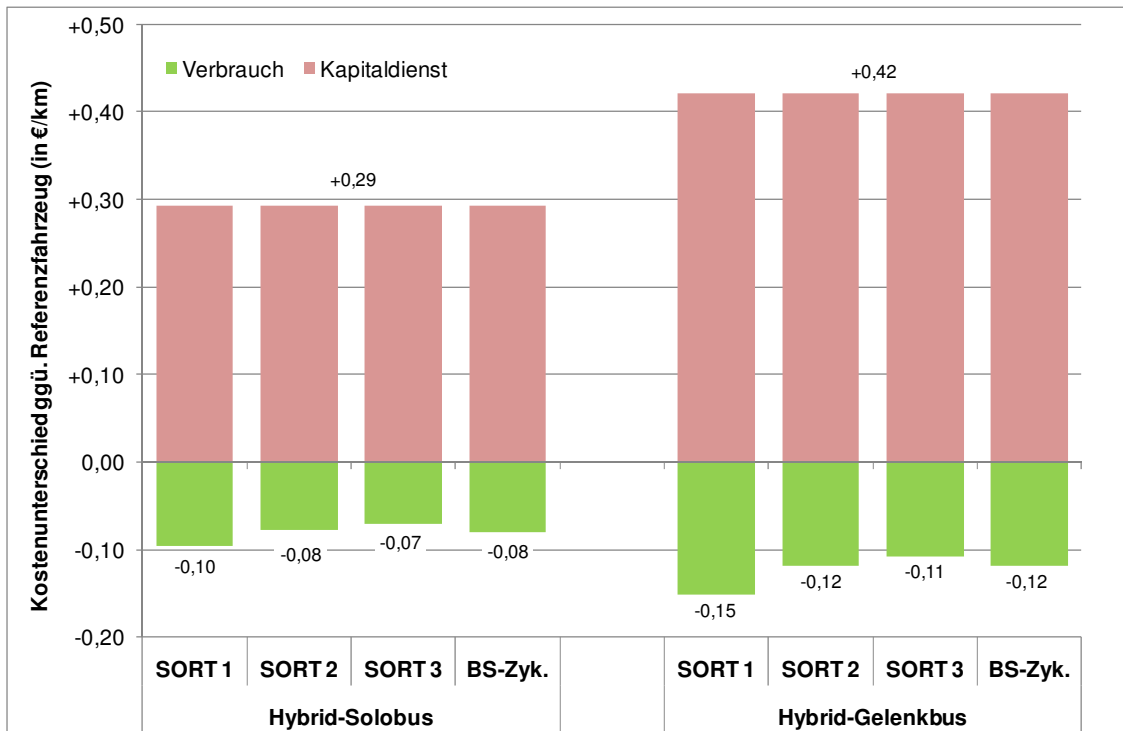


Abbildung 63: Kostenunterschiede für Kapitaldienst und Kraftstoffverbrauch zwischen den Hybridbussen und modernen Diesel-Referenzbussen bei einer Nutzungsdauer von 12 Jahren

Bei einer kürzeren Nutzungsdauer ergeben sich noch ungünstigere Verhältnisse; für eine vor diesem Hintergrund im Weiteren unterstellte Nutzungsdauer von 12 Jahren ergeben sich unter Einbeziehung der Kosten für Instandhaltung und Versorgung insgesamt folgende fahrzeugbezogene Kosten:

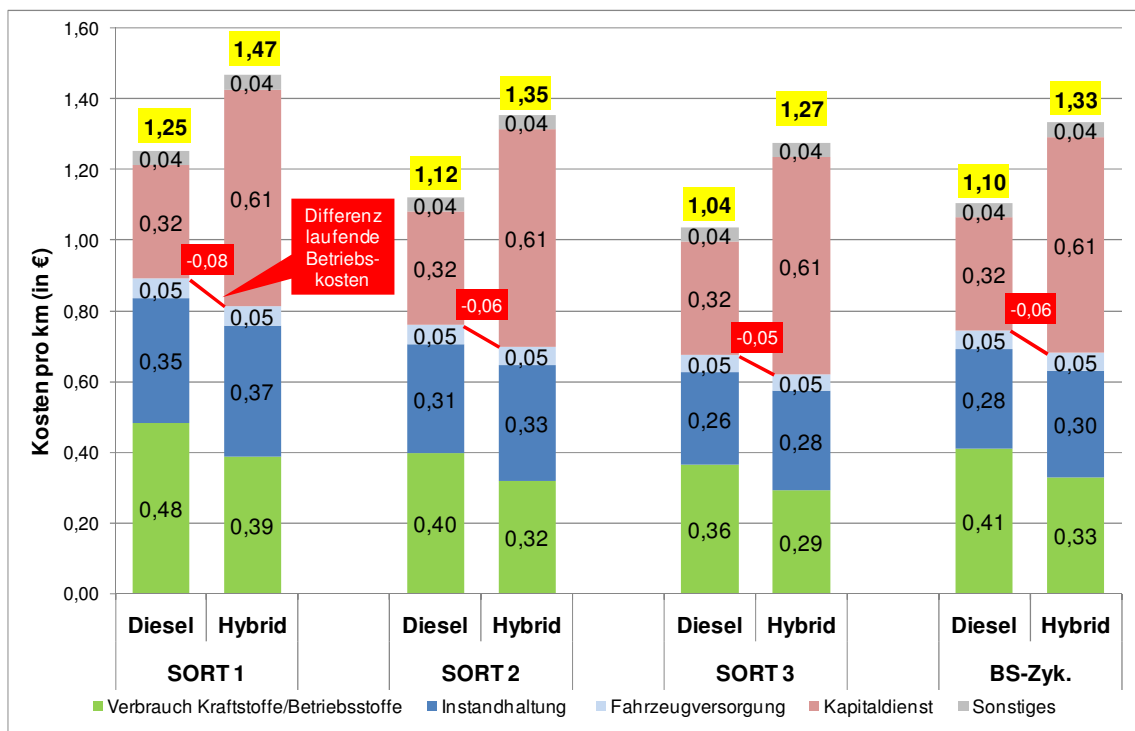


Abbildung 64: Fahrzeugbezogene Kosten im Vergleich – SORT 1-3 und Braunschweig-Zyklus

(Hybrid-Solobus)

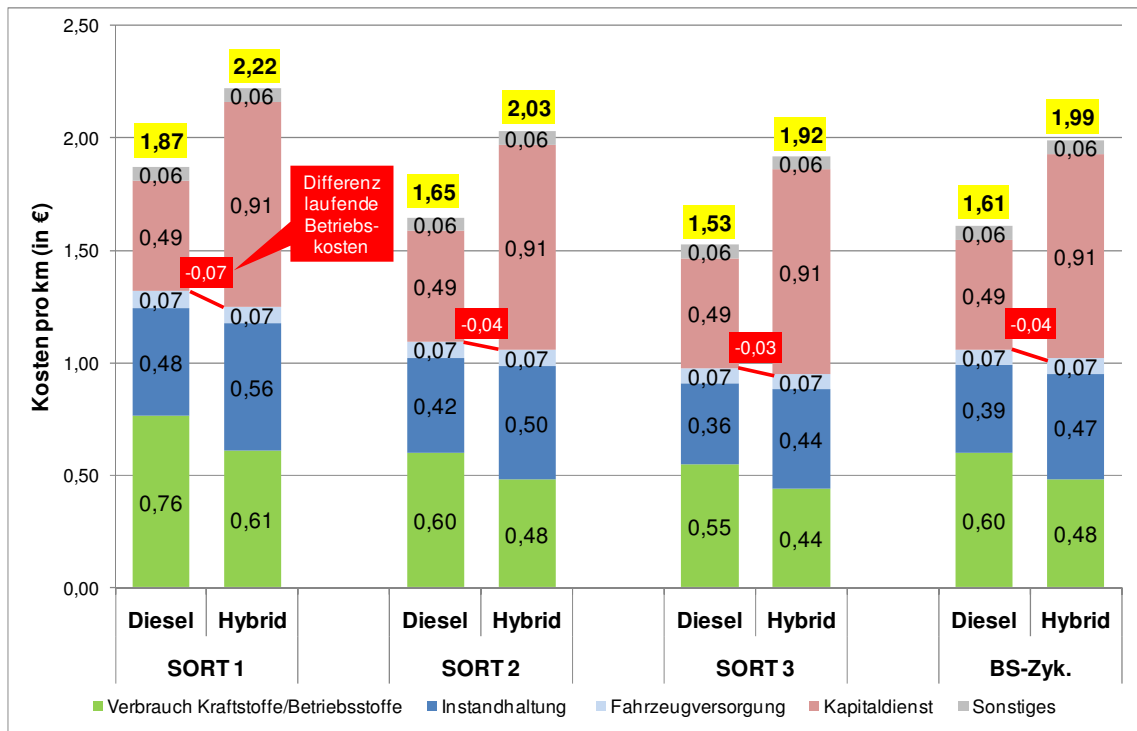


Abbildung 65: Fahrzeugbezogene Kosten im Vergleich – SORT 1-3 und Braunschweig-Zyklus (Hybrid-Gelenkbus)

5.2.3.2 Re-Evaluierung der Struktur der systembedingten Zusatzkosten

Im Vorfeld der Befragung der Verkehrsunternehmen wurde als Arbeitshypothese zunächst eine vierteilige Struktur der systembedingten Zusatzkosten erstellt (vgl. Kapitel 5.2.2.2). Die vier Kostengruppen lauteten:

- Vorhaltung der Fahrzeugreserve
- Anpassungen Werkstattausrüstung
- Personalschulungen Fahrdienst und Werkstatt
- Ersatzteilverhaltung

Diese viergliedrige Struktur hat sich auch im nun abgeschlossenen Vorhaben als sinnvoll und den realen Verhältnissen angemessen bestätigt. So wurde durch die teilnehmenden Verkehrsunternehmen kein weiterer Bereich genannt, in dem systembedingte Zusatzkosten durch den Einsatz der Hybridbusse aufgetreten wären. Eine entsprechende Abfrage erfolgte am Rande der Befragung zu den Erfahrungen bei der Inbetriebnahme (siehe AP 2.3). Dies gilt mit gewissen Einschränkungen – insbesondere hinsichtlich der im Anschluss erfolgenden Monetarisierung – für den Bereich der Ersatzteilverhaltung.

A - Vorhaltung der Fahrzeugreserve

In der „Vorhaltung der Fahrzeugreserve“ sind die zusätzlich erforderlichen Reservekilometer enthalten, die aus der angenommenen geringeren technischen Verfügbarkeit der Hybridbusse gegenüber konventionellen Dieselfahrzeugen resultieren.

Die Betrachtung der Realwerte aus den ersten Betriebsmonaten zeigt, dass die ursprünglich getroffenen Annahmen bezüglich der technischen Verfügbarkeit der neuen Hybridfahrzeuge sehr vorsichtig waren. In der Analyse der ermittelten Ausfalldaten zeigt sich, dass allein aufgrund von Defekten und Ausfällen im Hybridantriebsstrang (und nur diese fließen ja in die Betrachtung der systembedingten Zusatzkosten ein) nur bei wenigen Fahrzeugen signifikante Ausfallzeiten zu verzeichnen waren. Von den untersuchten 49 Fahrzeugen waren im Beobachtungszeitraum (Inbetriebnahme bis 29.02.2012) 28 zu mehr als 95 Prozent verfügbar, 11 davon erreichten volle 100 Prozent Verfügbarkeit. In umgekehrter Wirkrichtung waren nur 8 Fahrzeuge aufgrund hybridbedingter Ausfälle weniger als 85 Prozent der theoretisch möglichen Einsatzzeit ab Inbetriebnahme verfügbar. Diese Verfügbarkeitsraten bewegen sich größtenteils in Bereich von +/- 80 Prozent.

Lediglich ein Fahrzeug, bei dem unter anderem das Summiergetriebe havariebedingt ausgewechselt werden musste, zeigte aufgrund der bis dato kurzen Einsatzzeit eine Verfügbarkeit von nur 58 Prozent. Diese Havarie und einige weitere mit der gleichen Fehlerquelle führten in der Folge dazu, dass auch bei weiteren Fahrzeugen zur Sicherheit die Summiergetriebe überprüft und in Einzelfällen vorsorglich getauscht wurden, ohne dass in der konkreten Situation ein Defekt vorlag. Auch diese vorsorglichen Prüf- und Tauschvorgänge sind in der Verfügbarkeitsquote bereits enthalten.

Wie das Beispiel des Summiergetriebes zeigt, haben die Daten aus der bisherigen Havarieauswertung nur eine begrenzte Aussagekraft. Dies liegt im Wesentlichen an folgenden Faktoren:

- Geringe Stichprobe
- Nach wie vor kurze Einsatzzeit
- Schwierige Abgrenzung zwischen hybridbedingten und sonstigen Ausfallgründen

Dort, wo etwas niedrigere Verfügbarkeitsquoten vorliegen, zeigt eine Einzelfallbetrachtung häufig, dass die Gründe des Fahrzeugstillstands nicht repräsentativ der Hybridtechnologie anzulasten sind, etwa bei Abstimmungsproblemen zwischen Fahrzeughersteller und Verkehrsunternehmen bezüglich der Dokumentation zu den Hybridfahrzeugen, was dazu führte, dass die Busse bis zur Klärung nicht eingesetzt wurden.

Mit Blick auf die durchschnittliche Verfügbarkeitsquote pro Hersteller/Fahrzeugtyp, die in Bezug auf den Hybridantriebsstrang in allen Fällen über 90 Prozent liegt, stellt sich die Frage, ob die ursprünglich angesetzten Ausfallraten als Basis für die Ermittlung der zusätzlichen Reservekilometer beibehalten oder modifiziert werden müssen. Grundsätzlich ist zu bedenken, dass zu den hybridbedingten Ausfällen auch sonstige Ausfallursachen den Bus zum Stillstand zwingen können.

Prinzipiell wird kein Verkehrsunternehmen bei Systemzutritt zu einer neuen Technologie auf eine zusätzliche Sicherheitsreserve verzichten. Die vorliegenden Daten lassen jedoch die initial angenommene Verfügbarkeit von 70 Prozent als zu niedrig erscheinen. Andererseits ist es schwierig, auf der bislang bestehenden Datenbasis eine repräsentative prozentuale Verfügbarkeit zu unterstellen – zumal für künftig kommende Hybridbusgenerationen weiterer Hersteller.

Exerziert man das der ursprünglichen Annahme (70-80-90 Prozent) zu Grunde liegende Rechenverfahren für eine durchgehende Verfügbarkeit von 85 Prozent in den ersten 5 Jahren (danach 90 Prozent wie beim Dieselbus) durch, so beträgt die Mehrbelastung pro Fahrzeugkilometer nur noch 2 ct. – sowohl beim Solobus als auch beim Gelenkzug.

Mit Blick auf die bislang verfügbaren Werte und die bestehenden Unwägbarkeiten wird empfohlen, diese 2 ct. pro Kilometer Laufleistung als Pauschalwert in die Berechnung der systembedingten Zusatzkosten einzubeziehen – unabhängig vom Fahrzeugtyp.

B - Anpassungen Werkstattausrüstung

Unter „Anpassungen Werkstattausrüstung“ werden alle hybridbedingten Anschaffungen subsummiert, d.h. sowohl technische Ein-/Umbauten in den Betriebshöfen und Werkstätten als auch Diagnosesysteme, Werkzeuge oder persönliche Schutzausrüstungen der Mitarbeiter. Zunächst dienen hier vorab erhobene Angaben der Fahrzeughersteller als Orientierung, inzwischen lassen sich anhand der finalen Projektabrechnung und Nachweisführung für das Verbundvorhaben RegioHybrid die getroffenen Annahmen anhand von Realwerten auf Unternehmensebene überprüfen (s. Anhang B 1).

Einzelne Kategorien, z. B. Fahrzeugversorgungssysteme, konnten bereits im Vorfeld aus der Betrachtung ausgeschlossen werden, weil dort keine Abweichungen zwischen Hybrid- und Dieselbus zu identifizieren waren. Dies betrifft beispielsweise die vorhandenen Fahrzeugversorgungseinrichtungen (Kühlwasser, Heizöl, Diesel, Ad Blue), die von den Hybridbussen unverändert mit genutzt werden können.

In den Rückmeldungen der Verkehrsunternehmen findet sich kein Anhalt dafür, dass im Bereich der Werkstattausrüstung zusätzliche Kategorien in die Betrachtung aufgenommen werden müssten.

Generell ist hinsichtlich der Wartung und Instandhaltung darauf hinzuweisen, dass die Laufzeit des gesamten Prüfprogramms vollständig innerhalb der Garantie- und Gewährleistungszeiträume lag. Es wird jedoch davon ausgegangen, dass die nach Ablauf dieser Fristen zu erwartenden Arbeiten an den Hybridfahrzeugen, die von den Verkehrsunternehmen selbst durchgeführt werden, mit der vorhandenen bzw. im Rahmen dieser Betrachtung berücksichtigten Werkstattausrüstung durchgeführt werden können. Umfangreichere Arbeiten wie der turnusmäßige Austausch eines Batteriespeichers beim Solaris nach sechs bis acht Jahren Nutzungsdauer werden dagegen mit großer Sicherheit in einer Vertragswerkstatt oder gar direkt beim Hersteller durchgeführt.

C - Personalschulungen Werkstatt und Fahrdienst

Die Personalschulungen fallen im Werkstattbereich und im Fahrdienst an. Auch hier werden nur diejenigen Schulungen betrachtet, die aufgrund der Hybridtechnologie zusätzlich anfallen, nicht dagegen Schulungen, die technologieneutral mit der Einführung eines neuen Fahrzeugtyps einhergehen. Die Schulungsinhalte betreffen zum einen Sicherheitsaspekte (z. B. Hochvoltsensibilisierung), zum anderen Spezifika in der Bedienung von Hybridbussen.

D - Ersatzteilverhaltung

Der Bereich „Ersatzteilverhaltung“ wurde ursprünglich unter der Annahme in die Beobachtungen einbezogen, dass möglicherweise in den Verkehrsbetrieben zusätzliche Lagerkapazitäten für Hybridkomponenten oder besonders ausgestattete Lagerbereiche, etwa für die Einlagerung von Batterien oder anderen gefährlichen Gütern erforderlich werden könnten. Diese Annahme hat sich bereits im Vorfeld nicht bestätigen lassen.

Als weiterer Aspekt der Lagerhaltung ist die Kapitalbindung durch Ersatzteile zu nennen. Jedoch zeigt sich auch hier, dass für die Verkehrsunternehmen absehbar keine zusätzlichen Kosten entstehen. Das liegt an der Struktur für die Versorgung mit Hybridersatzteilen: Diese wird vollumfänglich durch die Fahrzeug- oder Traktionshersteller sichergestellt, die hierfür eigene Zentrallager und Vertriebswege betreiben oder die Leistung von spezialisierten Automotive-Suppliern erbringen lassen. Somit liegt das finanzielle Risiko der Ersatzteilverhaltung auf Seiten des Herstellers. An dieser Konstellation wird sich auch zumindest in der Garantie- und Gewährleistungsphase nichts ändern.

Sollten sich im Laufe des Praxisbetriebs typische Ausfallkomponenten ergeben, die regelmäßig ersetzt werden müssen, so ist vorstellbar, dass sich zumindest die Verkehrsunternehmen mit größeren Hybridbusflotten nach Ablauf der Garantiefrieten einen Basisbestand selbst einlagern. Welche Komponenten hierfür in Frage kommen, lässt sich jedoch nach der bislang kurzen Betriebszeit noch nicht definieren, zumal es sich dabei voraussichtlich um Teile handeln wird, die einem starken Verschleiß unterliegen und weniger um die „Opfer“ so genannter Kinderkrankheiten, die aktuell am ehesten für Ausfälle sorgen. Zum Ersatzteilmanagement sei an dieser Stelle auch auf die Ausführungen zu AP 2.2 verwiesen.

Eine Gegenüberstellung der Annahmen bezüglich der systembedingten Zusatzkosten mit den Realwerten der Projektabrechnung von RegioHybrid zeigt, dass die Realwerte die berechneten Annahmewerte zum Teil deutlich übersteigen. Insbesondere bei den Unternehmen mit einer Kleinst-„Flotte“ von nur einem Fahrzeug fallen Kosten von bis zu 0,69 Euro/Fahrzeugkilometer allein für die Werkstattausstattung an.

Allerdings müssen zwei wesentliche Faktoren berücksichtigt werden:

Zum einen ist die Stichprobe mit nur 10 Verkehrsunternehmen denkbar gering. Diese Grundgesamtheit ist nicht geeignet, einzelne „Ausreißer“ im Durchschnitt zu kompensieren.

sieren. Im geschilderten Fall der immensen Werkstattausrüstungskosten zeigt beispielsweise die Einzelfallbetrachtung, dass die Werkstatt auch von einem Partnerunternehmen (ebenfalls im Verbund RegioHybrid) mitgenutzt wird – bei diesem Partnerunternehmen sind deshalb wiederum unterdurchschnittliche Werkstattkosten angefallen.

Zum anderen ist bei den Schulungskosten die besondere Schulungsstrategie der MAN-Akademie zu berücksichtigen. Die dort angebotenen Qualifizierungsmaßnahmen haben eine sehr große inhaltliche Tiefe, allerdings beziehen sich die Inhalte nicht ausschließlich auf hybridrelevante Kenntnisse. Das integrierte Gesamtkonzept erlaubt wiederum keine Extraktion der reinen Hybridschulungsanteile, so dass die relativen Schulungskosten hier eher überdurchschnittlich sind.

Sowohl DVB als auch LVB wiederum hatten schon vor RegioHybrid Hess-Hybridbusse in ihrem Fuhrpark, deshalb wurden im Rahmen von RegioHybrid keine Qualifizierungsmaßnahmen für diese Fahrzeuge mehr abgerechnet.

E – Systembedingte Zusatzkosten – Zusammenfassung

Grundsätzlich wird eine Nachevaluierung der systembedingten Zusatzkosten nach einer Einsatzdauer von mindestens einem Jahr empfohlen, um annähernd repräsentative Aussagen über deren Entwicklung im praktischen Linieneinsatz treffen zu können.

Die Annahmen zur Reservevorhaltung lassen sich abschließend erst verifizieren bzw. korrigieren, wenn die erste Generation der Hybridbusse ihre Einsatzdauer erreicht hat, wobei natürlich vorher grob abgeschätzt werden kann, ob die angenommenen Ausfallraten in Größenordnungen richtig oder falsch sind. In diesem Kontext sei auf die Ausführungen im entsprechenden Kapitel 5.2.2 verwiesen; anhand der bisherigen Ergebnisse wird empfohlen, einen pauschalen Wert von 0,02 €/Fahrzeugkilometer anzusetzen, um eine aufgrund der Hybridtechnologie möglicherweise erhöhte Ausfallrate und die damit erforderlichen zusätzlichen Reservekilometer zu kompensieren.

Im Übrigen haben sich die ursprünglich getroffenen Annahmen im Bereich der systembedingten Zusatzkosten bestätigen lassen bzw. konnten aufgrund der noch immer sehr kurzen Einsatzzeit der Hybridbusse keine zusätzlichen Erkenntnisse gewonnen werden.

Dies bedeutet, dass sich die systembedingten Zusatzkosten mit heutigem Stand wie folgt zusammensetzen:

- **A – Fahrzeugreserve:** pauschal 0,02 €/Fz.-km (unabhängig von der Fahrzeugklasse)
- **B – Werkstattausrüstung:** pauschal 83.050,00 € bzw. ab 8 Fahrzeugen 113.400,00 € für Mindestausstattung (detaillierte Darstellung und flottenabhängige Umlegung auf die Laufleistung vgl. Tabelle im Anhang)
- **C – Schulungen:** Referenzwert 10.000,00 €/Verkehrsunternehmen (flottenabhängige Umlegung auf die Laufleistung vgl. Tabelle im Anhang)

Mit der entfallenen Unterscheidung zwischen Gelenk- und Solobussen im Bereich der Fahrzeugreserve (die Unterscheidung war nach Anpassung der Verfügbarkeitsrate rechnerisch nicht mehr darzustellen – der exakte Rechenwert beträgt 1,549 ct/km für Solobusse und 2,338 ct/km für Gelenkzüge, nach Rundung also 2 ct/km für beide Fahrzeugtypen) lässt sich ein von der Flottengröße abhängiger Zuschlag für die systembedingten Zusatzkosten nun in einer konsolidierten Tabelle darstellen:

Tabelle 20: Systembedingte Zusatzkosten des Hybridbuseinsatzes

Hybridbus-Flotte	MIT eigener Wartung/Instandhaltung				OHNE eigene Wartung/Instandhaltung			
	Reserve	Werkstatt	Schulungen	Summe	Reserve	Werkstatt	Schulungen	Summe
1 Fz.	0,02 €	0,12 €	0,01 €	0,15 €	0,02 €	- €	0,00 €	0,02 €
2 Fz.	0,02 €	0,06 €	0,01 €	0,09 €	0,02 €	- €	0,00 €	0,02 €
3 Fz.	0,02 €	0,04 €	- €	0,06 €	0,02 €	- €	0,00 €	0,02 €
4 Fz.	0,02 €	0,03 €	- €	0,05 €	0,02 €	- €	0,00 €	0,02 €
5 Fz.	0,02 €	0,02 €	- €	0,04 €	0,02 €	- €	0,00 €	0,02 €
6 Fz.	0,02 €	0,02 €	- €	0,04 €	0,02 €	- €	0,00 €	0,02 €
7 Fz.	0,02 €	0,02 €	- €	0,04 €	0,02 €	- €	0,00 €	0,02 €
8 Fz.	0,02 €	0,02 €	- €	0,04 €	0,02 €	- €	0,00 €	0,02 €
9 Fz.	0,02 €	0,02 €	- €	0,04 €	0,02 €	- €	0,00 €	0,02 €
10 Fz.	0,02 €	0,02 €	- €	0,04 €	0,02 €	- €	0,00 €	0,02 €
11 Fz.	0,02 €	0,01 €	- €	0,03 €	0,02 €	- €	0,00 €	0,02 €
12 Fz.	0,02 €	0,01 €	- €	0,03 €	0,02 €	- €	0,00 €	0,02 €
13 Fz.	0,02 €	0,01 €	- €	0,03 €	0,02 €	- €	0,00 €	0,02 €
14 Fz.	0,02 €	0,01 €	- €	0,03 €	0,02 €	- €	0,00 €	0,02 €
15 Fz.	0,02 €	0,01 €	- €	0,03 €	0,02 €	- €	0,00 €	0,02 €
16 Fz.	0,02 €	0,01 €	- €	0,03 €	0,02 €	- €	0,00 €	0,02 €
17 Fz.	0,02 €	0,01 €	- €	0,03 €	0,02 €	- €	0,00 €	0,02 €
18 Fz.	0,02 €	0,01 €	- €	0,03 €	0,02 €	- €	0,00 €	0,02 €
19 Fz.	0,02 €	0,01 €	- €	0,03 €	0,02 €	- €	0,00 €	0,02 €
20 Fz.	0,02 €	0,01 €	- €	0,03 €	0,02 €	- €	0,00 €	0,02 €



5.2.3.3 Gesamtkosten

Die fahrzeugbezogenen Kosten und die systembedingten Zusatzkosten sind in den folgenden Abbildungen zusammengeführt:

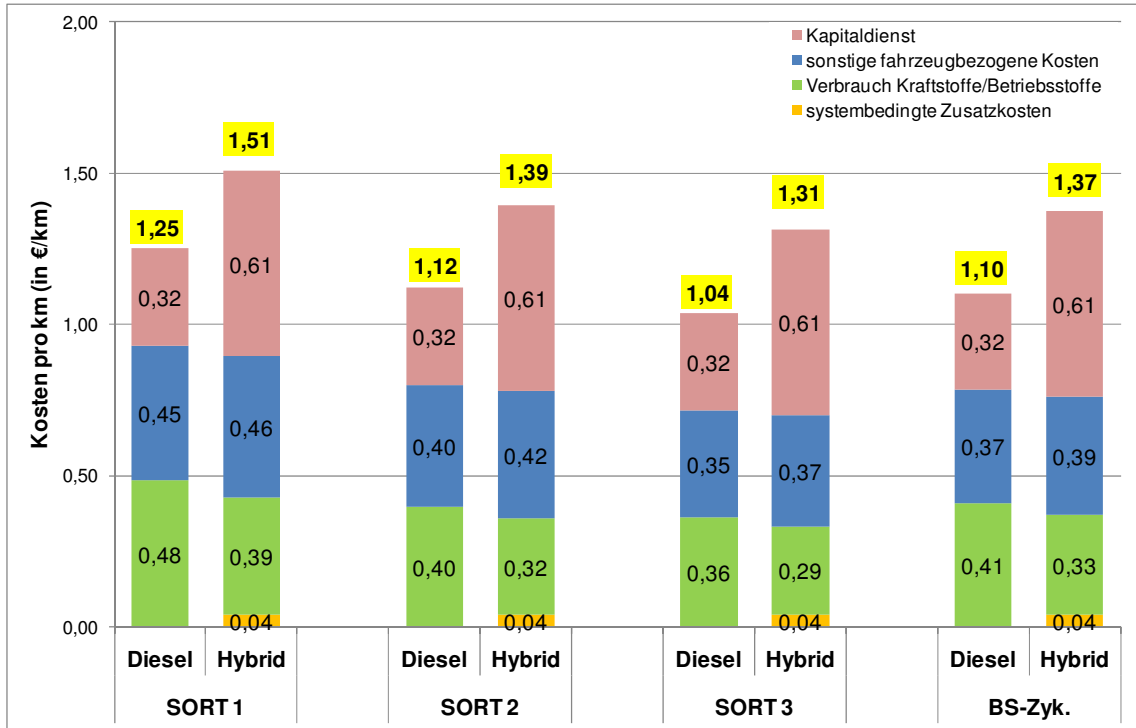


Abbildung 66: Spezifische Kostenauswertung Hybrid-Solobus

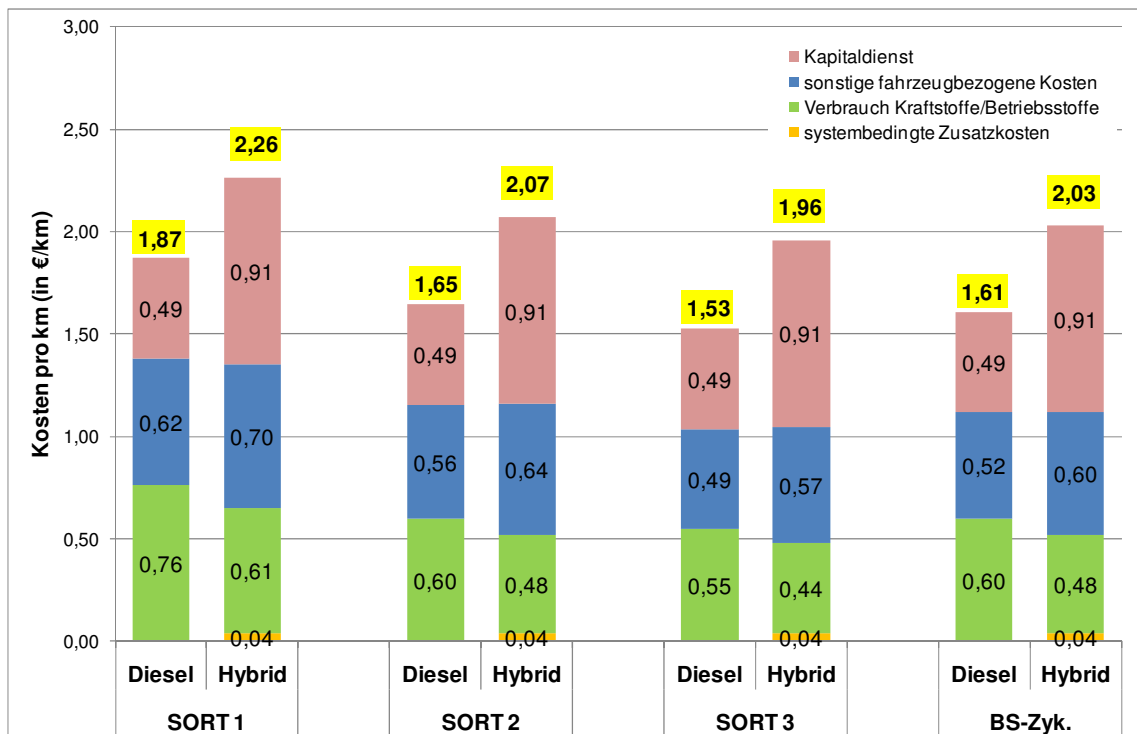


Abbildung 67: Spezifische Kostenauswertung Hybrid-Gelenkbus

Dabei wird für die systembedingten Zusatzkosten eine Hybridbus-Kleinflotte von 5-6 Fahrzeugen mit Durchführung der Instandhaltung in Eigenleistung dargestellt.

Im Ergebnis lässt sich zusammenfassend feststellen:

- Den nach heutigem Stand der Technik unter günstigen Bedingungen erreichbaren Einsparungen der Hybridbusse durch Verbrauchsreduzierungen in einer Bandbreite von ca. 0,07-0,15 €/km stehen im laufenden Betrieb fahrzeugbezogene Mehraufwendungen im Bereich der Instandhaltung von ca. 0,02-0,08 €/km gegenüber; ohne die Berücksichtigung systembedingter Zusatzkosten ist ein Vorteil bei den laufenden Betriebskosten (Kraftstoffverbrauch, Instandhaltung und Versorgung) in einer Bandbreite von ca. 0,03-0,08 €/km zu erwarten.
- Die hier abgeschätzten systembedingten Zusatzkosten für eine Hybridbus-Kleinflotte von 5-6 Fahrzeugen betragen ca. 0,04 €/km und liegen damit teilweise in der Größenordnung des Vorteils bei den laufenden fahrzeugbezogenen Betriebskosten, so dass aus dem Verbrauchsvorteil der Hybridbusse ggf. nur geringe Anteile für eine zumindest teilweise Refinanzierung der gegenüber Diesel-Referenzbussen deutlich höheren Kapitaldienste verbleiben.
- Ein wesentlicher Faktor bei den systembedingten Zusatzkosten sind dabei die prognostizierten höheren Ausfallraten in den ersten Betriebsjahren der frühen Serien-Hybridbusse, während mittelfristig von einer Angleichung an die Ausfallrate von Diesel-Referenzbussen ausgegangen wird (vgl. Abschnitt 5.2.3.2).
- Um vor dem Hintergrund des Klimaschutzziels einen maßgeblichen Flottenanteil der Hybridbusse zu erreichen, bleibt bei heutigem Preisniveau der Hybridbusse zunächst eine Förderung notwendig, da ansonsten die zusätzlichen fahrzeugbezogenen Kapitaldienste die Hybridbusse unter betriebswirtschaftlichen Aspekten deutlich nachteilig erscheinen lassen.

5.3 Lösungsvorschläge und Optimierung

5.3.1 Zielsetzung und Vorgehensweise

Ziel dieses Arbeitspaketes ist es, Lösungsvorschläge zu generieren, die zu einer Verbesserung und Optimierung des Hybridbuseinsatzes führen. Soweit möglich wurden die Optimierungsvorschläge bereits in den teilnehmenden Betrieben angewendet und erprobt. Sie sind für zukünftige Nutzer der Technologie gedacht.

So wurden auf Grundlage der in AP 2 identifizierten Probleme sowie unter Einbeziehung der in AP1 gewonnenen Erkenntnisse innerhalb von AP3 konkrete Vorschläge zur Verbesserung des Hybridbuseinsatzes erarbeitet (AP 3.1).

Entsprechend des Arbeitsplans waren Optimierungsvorschläge schwerpunktmäßig für folgende Themen vorgesehen:

- Optimaler Einsatz von Hybridbussen in Abhängigkeit der räumlichen (z.B. topographischen) Gegebenheiten.
- Möglichkeiten zur stufenweisen Integration von Hybridbussen in aus konventionellen Fahrzeugen bestehenden Flotten.
- Maßnahmen zur Anpassung der Infrastruktur an den Einsatz von Hybridbussen.

Aufgrund der kurzen Einsatzzeit der Fahrzeuge von einigen Tagen bis maximal 5 Monaten können zum gegenwärtigen Zeitpunkt Verbesserungsvorschläge bzw. Schluss-

folgerungen und Handlungsempfehlungen in eingeschränktem Umfang zu folgenden Themenfeldern gemacht werden:

- Optimierung eines Fahrzeuges in Abhängigkeit des Einsatzprofils
- Fahrzeugbezogene Kosten der Hybridbusse im Vergleich zu konventionellen Dieseln
- Systembedingte Zusatzkosten des Hybridbuseinsatzes
- Garantiefälle
- Technischer Betrieb

Die jeweiligen Verbesserungsvorschläge wurden in Gesprächen mit den Betreibern und unter Einbeziehung der Fahrzeughersteller abgestimmt.

Bestandteil von AP 3.1 waren außerdem Messfahrten auf einem Testfeld, die der optimalen Einstellung der Fahrzeuge sowie der Ermittlung repräsentativer Kraftstoffverbräuche unter Testfeldbedingungen mit verschiedenen Steuerstrategien dienten. Für die Tests wurde ein Hybridbus (Gelenkbus) mit Messtechnik ausgestattet.

Da der Bericht auch als Information für zukünftige Betreiber von Hybridbussen gedacht ist, dienen die dargelegten Erkenntnisse als Erfahrungs- und Lösungsspeicher für zukünftige Aktivitäten im Hybridbusbereich. Die derzeitige kurze Betriebserfahrung führt zu aktuell noch eingeschränkten Ergebnissen. Eine weitere Fortführung des Prüfprogramms könnte hier durch eine erweiterte Datenbasis zusätzliche Erfahrungen und Empfehlungen ermöglichen.

5.3.2 Optimierte Strategie zur Integration und Betrieb von Hybridbussen im Linieneinsatz

Die Typberichte in Anhang B 3 liefern zunächst einen grundlegenden Überblick über die technischen Eckdaten, die Charakteristik und die Produkthistorie der im Rahmen des Fördervorhabens „Hybridbusse für einen umweltfreundlichen ÖPNV“ eingesetzten Busse. Zudem erfolgen eine qualitative Einordnung der jeweiligen Einsatzbedingungen und eine Bewertung, wie sich die Busse unter diesen Bedingungen bewährt haben. Ergänzt werden die Typberichte durch einige quantitative Parameter, wobei im Bereich der Verbrauchsdaten die für den Praxisbetrieb wenig repräsentativen Rollenprüfstandsmessungen herangezogen wurden, um die Vergleichbarkeit und Reproduzierbarkeit der Werte sicherzustellen.

Im Vorlauf zur Inbetriebnahme der Hybridbusse in den Verkehrsunternehmen wurden mögliche Linien bezüglich ihrer Eigenschaften

- Länge
- Anzahl Haltestellen
- Reisezeit / Reisegeschwindigkeit laut Fahrplan
- Höhenprofil (Höhenänderungen pro Kilometer)

analysiert. Anhand der Daten wurden Abschätzungen hinsichtlich des Einsparpotenzials vorgenommen, aus denen wiederum Einsatzempfehlungen für die Verkehrsunternehmen abgeleitet werden konnten.

Basierend auf den erhobenen Daten wurde der Versuch unternommen, das Einsparpotenzial verschiedener Hybridbustypen in Abhängigkeit von der Liniencharakteristik zu systematisieren. In der nachfolgenden Tabelle sind die Linien, für die bis zum Zeitpunkt des Abschlussberichtes eine zumindest vertretbare Datengrundlage vorhanden war, sowie die darauf eingesetzten Fahrzeuge aufgeführt. Die Einsparungen werden an den Liniencharakteristiken und Hybridbustypen gespiegelt, um einen ersten Eindruck hinsichtlich der bevorzugten Einsatzmöglichkeiten der betrachteten Fahrzeugtypen zu erhalten.

Insgesamt eignen sich die Ergebnisse der Betriebsdatenerfassung noch nicht für abschließende Aussagen hinsichtlich der Eignung einzelner Antriebskonfigurationen für bestimmte Liniencharakteristiken. Vielmehr sollten die Daten nach Möglichkeit weiter erhoben bzw. in einen gemeinsamen Datenpool mit Ergebnissen anderer Projekte überführt werden.

In Summe spiegeln die Ergebnisse aus dem Praxiseinsatz den Entwicklungsstand der Hybridbusse wider und dokumentieren den teils noch erforderlichen Optimierungs- und auch Entwicklungsbedarf der Fahrzeugkonzepte.

Sonstige Probleme/Verbesserungsansätze für den Einsatz von Hybridbussen

In einigen Fällen muss klar festgestellt werden, dass die Kommunikation zwischen Hersteller und Verkehrsunternehmen, gerade in der Anfangsphase des Einsatzes einer neuen Technologie, einer ganz besonderen Pflege bedarf. Aus verschiedenen Gründen geschürte bzw. nicht stichhaltig ausgeräumte Vorbehalte gegenüber den Fahrzeugen oder auch zögerlich kommunizierte Systemoptimierungen wirken sich als „weicher Faktor“ unmittelbar auf die Fahrzeugverfügbarkeit aus. In mehreren Fällen konnte beobachtet werden, dass Fahrzeuge nicht aufgrund tatsächlicher Mängel im Depot standen, sondern wegen grundsätzlicher Erwägungen seitens der Verkehrsunternehmen, weil diese sich in für sie sicherheits- oder betriebsrelevanten Sachverhalten nicht oder nicht ausreichend informiert fühlten. Inwieweit dieses Problem hybridspezifisch ist oder auch bei der erstmaligen Inbetriebnahme neuer konventioneller Fahrzeugtypen auftritt, lässt sich nicht abschließend beurteilen. Da Hybridbusse aber in der Regel unter besonderer Beobachtung der Öffentlichkeit stehen, ist darauf zu achten, dass ihre Betreiber sie mit einem guten und sicheren Gefühl „vom Hof“ fahren.

Basierend auf den Ergebnissen des Prüfprogramms wird den Verkehrsunternehmen empfohlen, vor Einstieg in die Hybridtechnologie eine sorgfältige technische und wirtschaftliche Analyse der betrieblichen und räumlichen Verhältnisse durchführen zu lassen. Auch nach der relativ kurzen Beobachtungszeit der im Projekt beschafften Fahrzeuge lässt sich deutlich erkennen, dass es nicht *den* Standard-Hybridbus gibt, der unabhängig vom jeweiligen Einsatzszenario optimale Verbrauchswerte erzielt. Das zeigt die relativ große Bandbreite der Verbrauchswerte. Auch bei einem zurzeit noch recht freundlichen Förderklima für Hybridbusse muss in aller Deutlichkeit gesagt werden, dass Hybridbusförderung kein Surrogat für anderweitig entfallene Zuwendungen zu Fahrzeugbeschaffungen darstellt. Ein Hybridbuseinsatz ist in jedem Fall mit zusätzlichem Aufwand verbunden (Stichwort systembedingte Zusatzkosten) und muss Bestandteil einer konsequenten Unternehmensphilosophie sein. Hier ist es natürlich von

Vorteil, wenn größere Fahrzeugflotten zum Einsatz gebracht werden, um Synergien in den Bereichen Werkstattausrüstung, Mitarbeiterqualifikation und später auch Ersatzteilmanagement auszuschöpfen. Analog zur Vorgehensweise im Verbund RegioHybrid kann es künftig von Nutzen sein, wenn sich mehrere Hybridbusanwender in einem Cluster zusammenfinden, um diese Synergien nutzen zu können (bspw. durch eine gemeinsam betriebene E-Mobilitäts-Werkstatt).

5.3.3 Kosten des Linienbetriebs pro Kilometer

Die betriebswirtschaftlichen Aspekte des Einsatzes von Hybridbussen im Vergleich zu konventionellen Dieselnbussen werden maßgeblich von folgenden Parametern beeinflusst:

- Entwicklung des Dieselpreises
Es ist davon auszugehen, dass die mittel- und langfristige Entwicklung der Energie- und Kraftstoffpreise weiterhin eine steigende Tendenz aufweist.
- Entwicklung der Hybridtechnik
Ggf. können zukünftig auch in der Praxis weitere, über die hier zugrunde gelegten Verbrauchsreduzierungen von 20 Prozent hinausgehende Kraftstoffeinsparungen realisiert werden.
Es ist davon auszugehen, dass sich die technische Verfügbarkeit zügig derjenigen von Dieselreferenzbussen angleicht.
- Einsatzcharakteristik der Fahrzeuge
Bereits die Verbrauchsmessungen auf dem Rollenprüfstand haben gezeigt, dass neben der Laufleistung die Einsatzcharakteristik (SORT 1-3, Braunschweig-Zyklus) maßgeblichen Einfluss auf das Einsparpotenzial der Hybridtechnik hat.
- Entwicklung der Anschaffungsmehrkosten von Hybridfahrzeugen
Insbesondere aus größeren Stückzahlen von Hybridfahrzeugen sollte ein Rückgang der Anschaffungsmehrkosten resultieren.
- Förderbedingungen

Den prognostizierten Einsparungen der Hybridbusse durch Verbrauchsreduzierungen stehen fahrzeugbezogene Mehraufwendungen im Bereich der Instandhaltung gegenüber.

Dennoch ergibt sich – ggf. eingeschränkt bei Berücksichtigung systembedingter Zusatzkosten – ein fahrzeugbezogener Vorteil bei den laufenden Betriebskosten (Kraftstoffverbrauch, Instandhaltung und Versorgung).

Mit Sensitivitätsanalysen im Hinblick auf die spezifischen Kostenwirkungen des Hybridbuseinsatzes können – ausgehend von heutigen Kostenstrukturen im Vergleich zu konventionellen Diesel-Bussen – quantifizierbare Aussagen darüber getroffen werden, bei welcher Preisentwicklung für Hybridbusse bzw. ab welchem Niveau der Kraftstoffkosten und ab welcher Laufleistung sich der Einsatz heute verfügbarer Hybridbusse unter betriebswirtschaftlichen Aspekten (mit und ohne Berücksichtigung von Fördermitteln) eher bzw. weniger anbietet.

Dies lässt für den Auftraggeber auch bei sich wandelnden wirtschaftlichen Rahmenbedingungen Rückschlüsse darauf zu, wie eine ggf. zunächst weiterhin notwendige Förderung des Hybridbuseinsatzes auszugestalten ist, um eine effiziente Lenkungswirkung der eingesetzten Mittel zu erreichen.

In den folgenden Abbildungen sind exemplarisch die Break-even-Verläufe (ohne die Berücksichtigung systembedingter Zusatzkosten) dargestellt

- bei einer Laufleistung von 60 Tkm p.a., einer SORT 2 entsprechenden Einsatzcharakteristik mit einer Kraftstoffeinsparung von 20 Prozent gegenüber Diesel-Referenzbussen und – wie bei den im Rahmen dieses Vorhabens betrachteten Fahrzeugen – mit einer 60 prozentigen Förderung der Anschaffungsmehrkosten sowie
- bei einer Laufleistung von 60 Tkm p.a., einer SORT 2 entsprechenden Einsatzcharakteristik mit einer Kraftstoffeinsparung von 20 Prozent gegenüber Diesel-Referenzbussen und – wie zeitnah zu fordern – ohne eine Förderung der Anschaffungsmehrkosten:

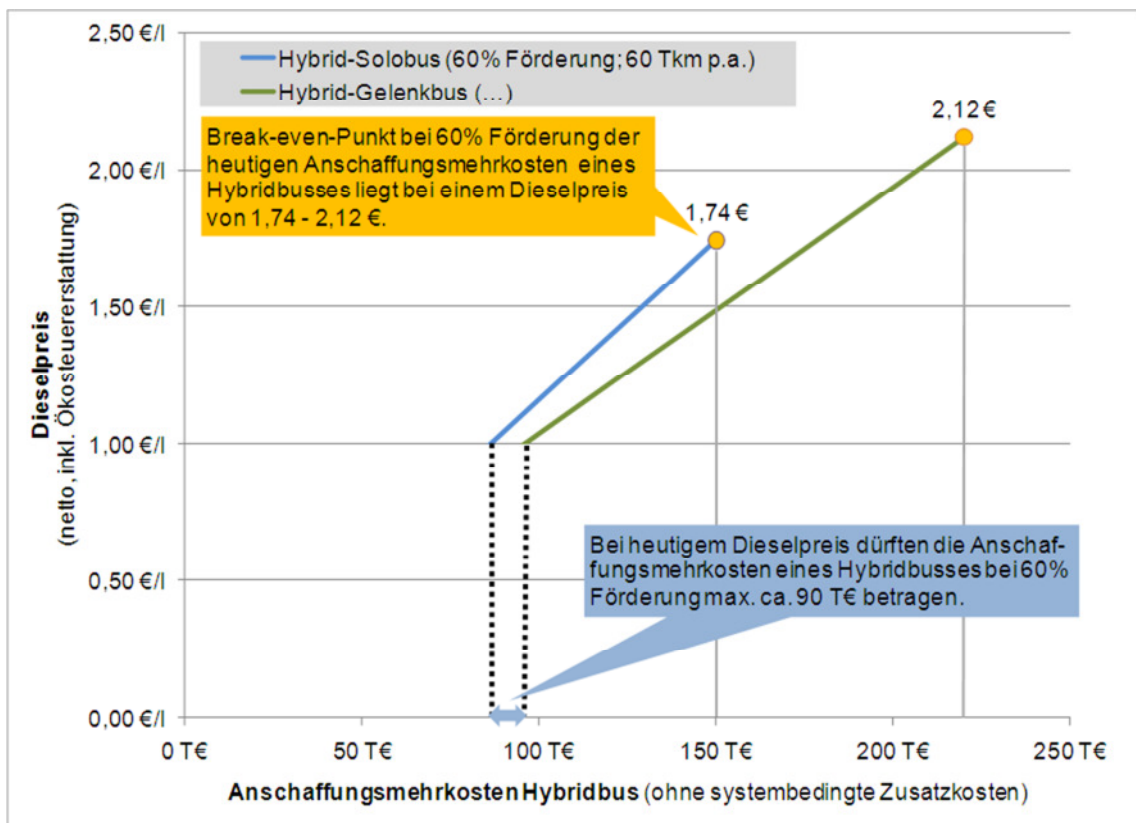


Abbildung 68: Break-even-Verlauf für die geförderten Hybridbusse mit einer Kraftstoffeinsparung von 20 Prozent gegenüber Diesel-Referenzbussen als Funktion des Dieselpreises und der Anschaffungsmehrkosten

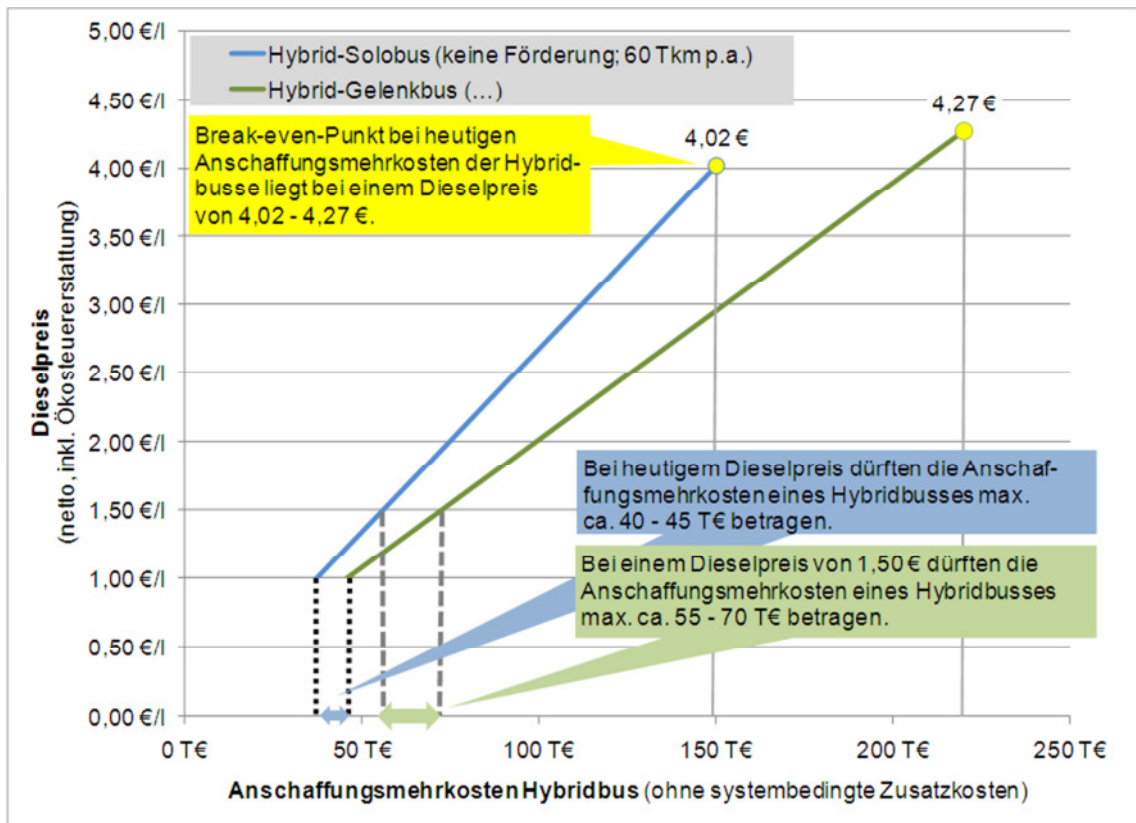


Abbildung 69: Break-even-Verlauf für nicht geförderte Hybridbusse mit einer Kraftstoffeinsparung von 20 Prozent gegenüber Diesel-Referenzbussen als Funktion des Dieselpreises und der Anschaffungsmehrkosten

Für diese Einsatzbedingungen ergibt sich aus heutiger Sicht folgendes Bild:

- Da die hier zugrunde gelegte Kraftstoffeinsparung von 20 Prozent gegenüber Diesel-Referenzbussen vor dem Hintergrund der Praxismessungen für den derzeitigen Stand der Hybridtechnik etwa das Maximum an erreichbaren Einsparungen repräsentieren dürfte, bilden
- die Entwicklung des Dieselpreises und
- die Entwicklung der Anschaffungsmehrkosten von Hybridfahrzeugen

die verbleibenden wesentlichen Einflussfaktoren für den wirtschaftlichen Betrieb von Hybridbussen.

- Bei der hier erfolgten 60-prozentigen Förderung wäre beim heutigen Dieselpreis ein wirtschaftlicher Betrieb von Hybridfahrzeugen möglich, wenn die Anschaffungsmehrkosten auf ca. 90 T€ zurückgingen.
- Ohne Förderung liegt der Break-Even-Punkt bei den derzeitigen Rahmenbedingungen (Anschaffungsmehrkosten der Hybridfahrzeuge und Einsparpotenzial beim Kraftstoffverbrauch) bei einem Dieselpreis zwischen 4,02 und 4,27 €/l.
- Beim heutigen Dieselpreisniveau dürften die Mehrkosten der Hybridfahrzeuge ohne Förderung max. ca. 40 - 45 T€ betragen; für einen Dieselpreis von 1,50 €/l erhöht sich dieser Wert auf ca. 55 - 70 T€.

Die exemplarisch dargestellten Szenarien zeigen, dass einem Rückgang der Anschaffungsmehrkosten – bzw. vorübergehend noch der Ausgestaltung etwaiger zukünftiger Förderprogramme für Hybridbusse – eine maßgebliche Bedeutung zukommt.

Im Übrigen ist in den aktuellen Förderbedingungen vorgesehen, dass nach 5 Jahren eine Nachkalkulation der tatsächlichen Betriebsmehrkosten des Hybridbuseinsatzes erfolgt, die zu einer (Teil-)Rückforderung von Fördermitteln führen könnte, falls tatsächlich Betriebskostenvorteile realisiert werden könnten.

Bereits aus den Erfahrungen in der Anfangsphase der Projektarbeit lässt sich ableiten, dass diese Regelung zu einem Interessenkonflikt in den Unternehmen führt, weil mögliche günstige Kostenentwicklungen mit der Befürchtung späterer Fördermittelrückzahlungen verbunden werden.

Es sollte daher für etwaige zukünftige Förderprogramme sichergestellt werden, dass aufgrund der Förderbedingungen keine kontraproduktiven Anreize für die Unternehmen bezüglich der Darstellung der Wirtschaftlichkeit des Hybridbuseinsatzes gegeben werden.

5.3.4 Ersatzteile und Garantiefälle

Der Ausbau der Ersatzteilverhaltung ist gemeinhin zu empfehlen, um Ausfälle von Hybridfahrzeugen vergleichbar schnell abzuwenden wie bei der konventionellen Diesels-technologie.

Des Weiteren sollte die Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit der Technologie durch ausgereifte Ersatzteil- und Wartungsprozesse sichergestellt werden, um zu vermeiden, dass es bei Busbetreibern durch den Einsatz der Hybridtechnologie zu längeren Ausfällen kommt. Auf Grund der noch geringen Ersatzteilverhaltung, kommt es bisweilen noch zu Verzögerungen im Reparaturablauf. An einer besseren Infrastruktur wird derzeit gearbeitet.

Bei Ausfällen auf Grund eines Fehlers im Hybridantriebsstrang wurden bislang Ersatzteile von den Herstellern gestellt.

Bis zum derzeitigen Projektzeitpunkt ist noch kein Garantiefall bekannt, der das Austauschen eines Fahrzeuges nötig machte bzw. der zu einer Rückgabe des Fahrzeuges führte.

5.4 Fazit zur betriebswirtschaftliche-technischen Betrachtung

Die Beschaffung und Inbetriebnahme der Hybridbusse in drei Regionen (Hannover, Lübeck und Sachsen) wurde von einem umfassenden Prüfprogramm bezüglich der ökonomischen sowie ökologischen Rahmenbedingungen begleitet. Der vorliegende Abschlussbericht legt die Ergebnisse dieser Untersuchungen dar, indem zunächst die technischen Eigenschaften wie z.B. Verfügbarkeit und Effizienz aus dem Betrieb der Hybridbusflotte analysiert werden. Auf dieser Basis wird dann die betriebswirtschaftliche Kostensituation beim Einsatz von Hybridbussen im Vergleich zu konventionellen modernen Dieselnissen beleuchtet.

Insgesamt kann den Hybridbussen im Hinblick auf ihre technische Verfügbarkeit bereits heute die grundsätzliche Marktreife attestiert werden. Die ursprünglich getroffenen Annahmen zu höheren Ausfallquoten in der Anfangsphase haben sich nach den ersten Betriebsmonaten nicht bestätigt, sondern es kristallisierte sich bereits nach kurzer Einlaufphase ein Trend hin zu einer Verfügbarkeit von mindestens 80 Prozent heraus.

Bei der technischen Inbetriebnahme hat sich außerdem gezeigt, dass die Hybridbusse hier keinen signifikanten Mehraufwand gegenüber konventionellen Dieselnissen verursachen. Dies liegt vermutlich auch an der besonderen Betreuung der Hybridbusse durch die Herstellerunternehmen. Noch weiter verbessert werden sollte die Kommunikation zwischen Herstellern und Verkehrsunternehmen, wo es gilt, im Vorfeld bestimmte Erwartungshaltungen zu präzisieren und beispielsweise Dokumentationspflichten zur Fahrzeugtechnologie, die auf Grund der Besonderheit der Hybridtechnologie von Bedeutung sind, exakt abzustimmen und den Verkehrsbetrieben zur Verfügung zu stellen.

Der Aspekt der Kraftstoffeinsparungen, ein wesentliches ökonomisches sowie ökologisches Argument für den Einsatz der Hybridtechnologie, weist jedoch noch Handlungsbedarf auf. An zehn der zwölf Standorte wurden zwar bereits in den ersten Betriebsmonaten Kraftstoffeinsparungen gegenüber den Dieselnissen erzielt, hier gibt es dennoch weiterhin Verbesserungspotentiale. An zwei Standorten war teilweise noch ein Mehrverbrauch zu verzeichnen. Auf Grund der noch relativ geringen Datenbasis sowie der Tatsache, dass an einigen Standorten ausschließlich Betriebsdaten für die kalten Wintermonate zur Verfügung standen, wird eine Fortführung der Datenerfassung und –evaluierung angeraten, um die tatsächlichen Einsparpotentiale über einen größeren Zeitraum und auf Basis einer breiteren Datengrundlage bewerten zu können. Eine erweiterte Datenbasis kann darüber hinaus wichtige Hinweise auf Effekte weiterer Optimierungsmaßnahmen liefern, die teilweise noch von den Busherstellern vorgesehen sind (z.B. Hess). Stellenweise wurden im Laufe des Projektes bereits Optimierungsmaßnahmen umgesetzt, deren Erfolg sich in den nächsten Monaten im Praxiseinsatz zeigen muss. Die Technologieentwicklung beim Hybridantrieb steht eher noch am Anfang und es ist daher zu erwarten, dass weitere Effizienzsteigerungen erreicht werden und die Hybridbusse durch eine Steigerung der Energieeffizienz und Umweltfreundlichkeit zu einem attraktiveren öffentlichen Personennahverkehr beitragen können.

Um im Rahmen des Klimaschutzziels einen maßgeblichen Flottenanteil der Hybridbusse zu erreichen und einen breiteren Marktzugang für diese Technologie zu ermöglichen, bleibt aus heutiger Sicht vorübergehend eine öffentliche Förderung im Sinne einer „Anschubfinanzierung“ notwendig, da die aus den gegenüber vergleichbaren Dieselnissen höheren Anschaffungskosten der Hybridbusse resultierenden zusätzlichen fahrzeugbezogenen Kapitaldienste die Einsparungen im laufenden Betrieb noch deutlich übersteigen.

Die entscheidende Rolle für die Wirtschaftlichkeit und damit Zukunftsfähigkeit der Hybridtechnologie spielt allerdings die zeitnahe Erschließung weiterer Optimierungspotentiale durch die Fahrzeughersteller sowohl im Hinblick auf die Herstellungskosten als auch die Kraftstoffeinsparungen: Grundsätzlich dürfen mittel- bis langfristig die Anschaffungs- und Instandhaltungsmehrkosten des Hybridbusses gegenüber einem kon-

ventionellen Dieselbus den Wert der im Lebenszyklus erzielbaren Kraftstoffeinsparungen nicht überschreiten.

Die Ausgestaltung etwaiger zukünftiger Förderprogramme muss jeweils von realistischen Annahmen zur Entwicklung von Dieselpreis und insbesondere Anschaffungsmehrkosten für Hybridfahrzeuge ausgehen. Die vorliegenden Verbrauchsmessungen im Praxisbetrieb weisen allerdings eine beträchtliche Streuung der tatsächlich erzielten Einsparungen auf. Diese Abweichungen lassen sich – zumindest bei den vorliegenden Daten – nicht ohne Weiteres auf einzelne dominante Merkmale der Einsatzcharakteristik (durchschnittliche Reisegeschwindigkeiten und Haltestellenabstände, spezifische Höhendifferenzen) zurückführen. Eine individuelle Konfiguration im Hinblick auf die jeweiligen konkreten Einsatzbedingungen erscheint erfolgversprechend. Es wird daher empfohlen, eine enge Abstimmung zwischen Herstellern und Verkehrsbetrieben bei der Inbetriebnahme sicherzustellen, sodass zum Einen das optimale Einsatzgebiet identifiziert und zum Anderen eine individuelle Konfiguration für das Einsatzgebiet vorgenommen werden kann, um das Kraftstoffeinsparpotential der Hybridbusse voll ausschöpfen zu können.

Es wird außerdem als sinnvoll erachtet, den Weg von Hybridbussen in die Alltagspraxis nicht nur durch die Förderung von Fahrzeugbeschaffung oder Dokumentationen zu ebnen, sondern gezielt auch solche Maßnahmen zu unterstützen, die dazu dienen, die Einsatzvorbereitung (Identifikation geeigneter Einsatzgebiete, Adaption der Fahrzeuge an die örtlichen Einsatzbedingungen) zu standardisieren und zu automatisieren. Beispiele hierfür wären

- Standardisierte Bewertungsverfahren für den Hybridbuseinsatz
- Selbstlernende Betriebs- und Energiemanagementsysteme in den Fahrzeugen

Vorrangig sollten im Ergebnis Fahrzeuge gefördert werden, die durch optimierten Einsatz in der Praxis eine relativ große Einsparung beim Kraftstoffverbrauch erzielen. Um einen entsprechenden wirtschaftlichen Anreiz zu setzen, erscheint aus heutiger Sicht eine Förderung zielführend, die an einer Kostenäquivalenz im Vergleich zum konventionellen Dieselbus

- bei einer mindestens zwölfjährigen Nutzungsdauer mit einer Fahrleistung von mindestens 60.000 km p.a. und
- bei einer Kraftstoffeinsparung von mindestens ca. 10 – 15 Prozent

ausgerichtet ist; der wirtschaftliche Vorteil ggf. darüber hinausgehend erzielter Kraftstoffeinsparungen könnte dann als Anreiz und Ausgleich für die wirtschaftlichen Risiken des Hybridbuseinsatzes bei den Verkehrsunternehmen verbleiben.

Um auf die Entwicklung der zu fordernden, sinkenden Anschaffungsmehrkosten für Hybridbusse einerseits und im Mittel voraussichtlich steigenden Dieselpreise andererseits angemessen zu reagieren, sollte das Volumen etwaiger Förderprogramme mindestens jährlich einer Neuberechnung anhand der relevanten Parameter unterzogen werden.

Um auch kleineren Verkehrsunternehmen den Zugang zur Hybridtechnologie zu ermöglichen, wird die Bildung von gemeinsamen regionalen Hybridbusclustern empfoh-

len, die eine Ausnutzung von Synergien, etwa im Bereich der Personalqualifikation oder der Wartung und Instandhaltung, erlauben.



Anhang A Übersicht Fahrzeuge

Tabelle 21: Übersicht Hybridbusse inkl. Einsatzbetrieb

Verkehrsbetrieb	amtl. Kz.	Hersteller	Typ	Solo oder Gelenk	Abgas-Norm	Länge [m]	Hybridantrieb				
							parallel	Konzept leistungsverzweigt	seriell	Supercaps	Speicher Akkus (z.B. Li-Ion, NiMH)
üstra Hannover	H-BF 301	Solaris	Urbino H18	Gelenk	EEV	18 m		x			x
üstra Hannover	H-BF 302	Solaris	Urbino H18	Gelenk	EEV	18 m		x			x
üstra Hannover	H-BF 303	Solaris	Urbino H18	Gelenk	EEV	18 m		x			x
üstra Hannover	H-BL 304	Solaris	Urbino H18	Gelenk	EEV	18 m		x			x
üstra Hannover	H-BL 305	Solaris	Urbino H18	Gelenk	EEV	18 m		x			x
üstra Hannover	H-BF 306	Solaris	Urbino H18	Gelenk	EEV	18 m		x			x
üstra Hannover	H-BF 307	Solaris	Urbino H18	Gelenk	EEV	18 m		x			x
üstra Hannover	H-BF 308	Solaris	Urbino H18	Gelenk	EEV	18 m		x			x
üstra Hannover	H-BF 309	Solaris	Urbino H18	Gelenk	EEV	18 m		x			x
üstra Hannover	H-BF 310	Solaris	Urbino H18	Gelenk	EEV	18 m		x			x
SV Lübeck	HL-SL 1495	HESS	SWISSHybrid 7822	Gelenk	EEV	18 m			x	x	
SV Lübeck	HL-SL 1496	HESS	SWISSHybrid 7823	Gelenk	EEV	18 m			x	x	
SV Lübeck	HL-SL 1497	HESS	SWISSHybrid 7824	Gelenk	EEV	18 m			x	x	
SV Lübeck	HL-SL 1498	HESS	SWISSHybrid 7825	Gelenk	EEV	18 m			x	x	
SV Lübeck	HL-SL 1499	HESS	SWISSHybrid 7826	Gelenk	EEV	18 m			x	x	
SV Lübeck	HL-SL 1695	MAN	A37 Lion's City Hybrid	Solo	EEV	12 m			x	x	
SV Lübeck	HL-SL 1696	MAN	A37 Lion's City Hybrid	Solo	EEV	12 m			x	x	
SV Lübeck	HL-SL 1697	MAN	A37 Lion's City Hybrid	Solo	EEV	12 m			x	x	
SV Lübeck	HL-SL 1698	MAN	A37 Lion's City Hybrid	Solo	EEV	12 m			x	x	
SV Lübeck	HL-SL 1699	MAN	A37 Lion's City Hybrid	Solo	EEV	12 m			x	x	
DVB Dresden	DD-VB 4612	HESS	SWISSHybrid	Gelenk	EEV	18 m			x	x	
DVB Dresden	DD-VB 4613	HESS	SWISSHybrid	Gelenk	EEV	18 m			x	x	
DVB Dresden	DD-VB 4614	HESS	SWISSHybrid	Gelenk	EEV	18 m			x	x	
DVB Dresden	DD-VB 6301	MAN	A37	Solo	EEV	12 m			x	x	
DVB Dresden	DD-VB 6302	MAN	A37	Solo	EEV	12 m			x	x	
DVB Dresden	DD-VB 6303	MAN	A37	Solo	EEV	12 m			x	x	
LVB Leipzig	L -NV 1208	HESS	SWISSHybrid 3 BGH - N2C	Gelenk	EEV	18 m			x	x	
LVB Leipzig	L -NV 1209	HESS	SWISSHybrid 3 BGH - N2C	Gelenk	EEV	18 m			x	x	
LVB Leipzig	L -NV 1210	HESS	SWISSHybrid 3 BGH - N2C	Gelenk	EEV	18 m			x	x	
Leobus Leipzig	L-VR-5151	MAN	A37	Solo	EEV	12 m			x	x	
Leobus Leipzig	L-VR-5152	MAN	A37	Solo	EEV	12 m			x	x	
Leobus Leipzig	L-VR-5153	MAN	A37	Solo	EEV	12 m			x	x	
Leobus Leipzig	L-VR-5154	MAN	A37	Solo	EEV	12 m			x	x	
Leobus Leipzig	L-VR-5155	MAN	A37	Solo	EEV	12 m			x	x	
Regionalverkehr Dresden	DD-RV 6601	MAN	A37	Solo	EEV	12 m			x	x	
Regionalverkehr Dresden	DD-RV 6602	MAN	A37	Solo	EEV	12 m			x	x	
VGMeißen	MEI-NV 300	MAN	A37	Solo	EEV	12 m			x	x	
VGMeißen	MEI-NV 400	MAN	A37	Solo	EEV	12 m			x	x	
Regiobus Mittelsachsen	FG-RM 670	MAN	A37	Solo	EEV	12 m			x	x	
Regiobus Mittelsachsen	FG-RM 671	MAN	A37	Solo	EEV	12 m			x	x	
Regiobus Mittelsachsen	FG-RM 672	MAN	A37	Solo	EEV	12 m			x	x	
VGDöbeln	FG-RM 673	MAN	A37	Solo	EEV	12 m			x	x	
VGDöbeln	FG-RM 674	MAN	A37	Solo	EEV	12 m			x	x	
VGDöbeln	FG-RM 675	MAN	A37	Solo	EEV	12 m			x	x	
VBFreiberg	FG-RM 676	MAN	A37	Solo	EEV	12 m			x	x	
VBFreiberg	FG-RM 677	MAN	A37	Solo	EEV	12 m			x	x	
VBFreiberg	FG-RM 678	MAN	A37	Solo	EEV	12 m			x	x	
VBFreiberg	FG-RM 679	MAN	A37	Solo	EEV	12 m			x	x	
SATRA Eberhardt	PIR-ST 157	MAN	A37	Solo	EEV	12 m			x	x	
Müller Busreisen	PIR-MB 916	MAN	A37	Solo	EEV	12 m			x	x	



Anhang B Systembedingte Zusatzkosten

Anhang B 1 Standardausrüstung Werkstatt



	Ausrüstung		Anschaffungskosten		
	1-7 Fahrzeuge	ab 8 Fahrzeuge	Einzelpreis	Gesamtpreis 1-7 Fz.	Gesamtpreis >= 8 Fz.
Elektrotechnischer Arbeitsbereich					
Prüfbox Hybrid Hochvolt System *	1	2	500,00 €	500,00 €	1.000,00 €
Hochvolt-Spezialwerkzeugsatz *	2	4	750,00 €	1.500,00 €	3.000,00 €
Spannungsprüfer *	2	4	500,00 €	1.000,00 €	2.000,00 €
Messgeräte *	1	2	1.500,00 €	1.500,00 €	3.000,00 €
Diagnoseeinheit	1	1	15.000,00 €	15.000,00 €	15.000,00 €
Schutzausrüstung Mitarbeiter (EN 1149) *	2	4	350,00 €	700,00 €	1.400,00 €
Absperrung der Arbeitsstelle und Beschilderung *	1	2	150,00 €	150,00 €	300,00 €
Hybridbus-Arbeitsplatz					
Arbeitsplattform (LBH 2 x 2 x 5,5 m)	1	1	5.000,00 €	5.000,00 €	5.000,00 €
Kran (stationär oder mobil), Hublast 0,5 t	1	1	10.000,00 €	10.000,00 €	10.000,00 €
Anschlagmittel (Ketten, Haken)	1	1	500,00 €	500,00 €	500,00 €
Flurfördergerät (z. B. Gabelstapler), Hublast 1,5 t	1	1	22.000,00 €	22.000,00 €	22.000,00 €
Dacharbeitsstand stationär oder mobil (LBH 5 x 1 x 5,5 m) *	1	2	25.000,00 €	25.000,00 €	50.000,00 €
Gefahrguthandling (Batteriesäure - nicht bei SC)					
Säureresistente Schutzkleidung (Schuhe, Handschuhe)	2	2	100,00 €	200,00 €	200,00 €
SUMME				83.050,00 €	113.400,00 €



Umlegung auf die Fahrleistung / LC in €/Fz.-km
(LC = 12 Jahre à 60.000 Fz.-km)

Hybridbus-Flotte	12 Jahre	5 Jahre	
1 Fz.	0,12 €	0,28 €	
2 Fz.	0,06 €	0,14 €	
3 Fz.	0,04 €	0,09 €	
4 Fz.	0,03 €	0,07 €	
5 Fz.	0,02 €	0,06 €	
6 Fz.	0,02 €	0,05 €	
7 Fz.	0,02 €	0,04 €	einfache Ausrüstung
8 Fz.	0,02 €	0,05 €	doppelte Ausrüstung
9 Fz.	0,02 €	0,04 €	
10 Fz.	0,02 €	0,04 €	
11 Fz.	0,01 €	0,03 €	
12 Fz.	0,01 €	0,03 €	
13 Fz.	0,01 €	0,03 €	
14 Fz.	0,01 €	0,03 €	
15 Fz.	0,01 €	0,03 €	
16 Fz.	0,01 €	0,02 €	
17 Fz.	0,01 €	0,02 €	
18 Fz.	0,01 €	0,02 €	
19 Fz.	0,01 €	0,02 €	
20 Fz.	0,01 €	0,02 €	

Anhang B 2 Fragebogen Inbetriebnahme

	Prüfprogramm „Effizienz- und Kostenanalyse für den Linienbetrieb“	
---	--	---

A Zulassung Fahrzeug

1. Welche Fahrzeugunterlagen hat die zuständige Zulassungsbehörde zur Zulassung abverlangt?

2. Musste bei der Zulassung eine Fahrzeugrechnung vorgelegt werden?
 ja nein
3. Musste eine Verzollung von Fahrzeugen vor der Zulassung erfolgen?
 ja nein
4. Gab es Unregelmäßigkeiten bei der Zulassung der Fahrzeuge?
 ja nein falls ja, bitte nachfolgend spezifizieren:

B Inbetriebnahme

5. Erfolgte die Inbetriebnahme der Fahrzeuge innerhalb des Unternehmens nach einem besonderen Abnahmeprotokoll?
 ja nein
6. Wie viele Stunden wurden für die Gesamtinbetriebnahme pro Fahrzeug angesetzt?
 ca. _____ Stunden
7. Wurde für den Hybridteil des Fahrzeuges eine gesonderte Inbetriebnahme durchgeführt?
 ja nein
8. Wie viele Stunden wurden hierfür angesetzt?
 ca. _____ Stunden
9. Erfolgte eine elektrotechnische Abnahme des Fahrzeuges nach berufsgenossenschaftlichen Grundsätzen?
 ja nein
10. Wurde durch den Hersteller eine elektrotechnische Abnahme durchgeführt und protokolliert?
 ja nein
11. Wurden die entsprechenden Nachweise durch den Hersteller geliefert?
 ja nein

AP 2.3
Befragung "Erfahrungen der Verkehrsunternehmen bei der Inbetriebnahme der Hybridbusse"



12. Erfolgte eine Abnahme nach den Grundlagen einer Hauptuntersuchung oder Sicherheitsprüfung?
ja nein

13. Erfolgte eine Abnahme des Fahrzeuges nach § 42 BOKraft?
ja nein

14. Erfolgte eine Abnahme des Fahrzeuges nach BG-Vorschriften?
ja nein

15. Wurde für das Fahrzeug eine Gefahrenbeurteilung/ein Sicherheitsblatt erstellt?
ja nein

16. Wie erfolgte die Arbeitsschutzbelehrung vor der Aufnahme der ersten Tätigkeiten am Fahrzeug?

C Mängel

17. Welche Mängel wurden bei der Inbetriebnahme festgestellt,

a) im allgemeinen Fahrzeugteil

b) im Hybridteil

D Inbetriebnahme der kundenspezifischen Anlagen

18. Konnten die kundenspezifischen Anlagen (z. B. Kasse, Entwerter, Anzeigen, RBL, Fahrgastinformationsanlagen, Blindeninformationsanlagen u.ä.) ohne zusätzliche Aufwendungen gegenüber einen Dieselbus installiert werden?

ja nein

19. Falls nein - wie hoch waren die zusätzlichen Aufwendungen?

ca. _____ Stunden

Anhang B 3 Typberichte

Fahrzeugbeschreibung

	HESS SWISSHybrid	MAN Lion's City Hybrid	Solaris Urbino 18 Hybrid
			
Fahrzeughersteller	Carrosserie Hess AG, Bellach (CH)	MAN Truck & Bus AG, München (D)	Solaris Bus & Coach S.A., Poznan (PL)
Traktionsausrüster	Vossloh-Kieoe GmbH, Düsseldorf (D)	MAN/Siemens, München (D)	Allison Transmission Inc., Indianapolis (USA)
genaue Typbezeichnung	Hess BGH-N2C	MAN Lion's City A37 Hybrid	Solaris Urbino 18 Hybrid II
Baujahr	2011	2011	2011
Fahrzeugbestand (alle VU)	13 (davon 2 aus BMVBS-Förderung)	29	10
Technische Daten:			
Fahrzeugmaße (L/B/H)	17.980/2.550/3.380 mm	11.980/2.500/3.300 mm	18.000/2.550/3.250 mm
Leermasse	19.580 kg	12.600 kg	17.500
zul. Gesamtgewicht	28.000 kg	18.000 kg	28.000
Anzahl Achsen	3	2	3
davon angetrieben	2	1	1
Sitz-/Stehplätze	33/83	37/49	48/94
Höchstgeschwindigkeit	80 km/h	79 km/h	80 km/h
Elektrische Traktionsmotoren	2 Drehstrom-Asynchronmotoren mit je 120 kW	2 Drehstrom-Asynchronmotoren mit je 75 kW	2 Drehstrom-Asynchronmotoren mit je 75 kW
Energieerzeugung Dieselmotor	220 kW	184 kW	180,5 kW
Energieerzeugung Generator	190 kW	150 kW	-
Energiespeicher	Doppelschichtkondensatoren (Supercaps)	Doppelschichtkondensatoren (Ultracaps)	Nickel-Metalhydrid-Batterien (NiMH)
Charakteristik	18 m Niederflur-Gelenkbus mit 4 Fahrgasttüren Serieller Hybridantrieb Besonderheit: ortsabhängiges Energiemanagementsystem	12 m Niederflur-Standardbus mit 3 Fahrgasttüren Serieller Hybridantrieb	18 m Niederflur-Gelenkbus mit 3 Fahrgasttüren Leistungsverzweigter Hybridantrieb
Produktgeschichte	Carrosserie HESS verfügt u. a. durch die langjährige Produktion von Obussen über umfassende Erfahrungen in der Elektrotraktion von Bussen. Das Engagement des Unternehmens im Bereich Hybridbusse war demnach nahe liegend. HESS ist gegenwärtig der einzige Hersteller von Doppelgelenk-Hybridbussen. Das Modell BGH-N2C Hybrid ist seit dem Jahr 2010 am Markt.	Unter dem Begriff Lion's City ist die MAN-Produktlinie für den niederflurigen Linienbusbereich seit dem Jahr 2004 zusammengefasst. Erste Hybridbusse mit Ultrakondensatoren von MAN kamen im Jahr 2001 teilweise in Nürnberg zum Einsatz, zwischen 2005 und 2008 wurden weitere Hybrid-Prototypen entwickelt. Als Vorserienmodell wurde der A37 bereits 2010 in München und Wien getestet, seit 2011 läuft die Serienproduktion für den Lion's City Hybrid. Ein Gelenkbus ist für 2012 projektiert.	Der polnische Busersteller Solaris ist schon seit mehreren Jahren im Hybridbussektor tätig. Der Urbino 18 war ab 2006 der erste serienmäßig gefertigte Hybridbus am europäischen Markt. Schon damals lieferte der us-amerikanische Traktionsausrüster Allison den Hybridantrieb. Der in Hannover eingesetzte Hybridgelenkbus gehört zur zweiten Generation der Urbino 18 Hybrid Familie. Er wird seit 2006 produziert. Zwischenzeitlich sind auch 12-m-Hybridbusse am Markt erhältlich, ebenso wie Hybridbusse mit anderen Traktionsausrüstern. Ein rein elektrischer Midibus befindet sich gegenwärtig in der Entwicklung, der Prototyp ist bereits fertiggestellt.

Anhang C Literaturverzeichnis

- /1/ Dreyer, W.; Stochastischer Fahrzyklus für Stadt-Linienbusse, Sonderforschungsbereich 97, Fahrzeuge und Antriebe, Technische Universität Braunschweig, Bericht Nr. 34, Februar 1975
- /2/ Burkhard, W.; Auswirkungen fahrdynamischer Vorgänge auf die Stand- und Sitzsicherheit von Kraftomnibussen im innerstädtischen Verkehr; Diplomarbeit am Institut für Kraftfahrwesen der Universität Hannover, März 1998
- /3/ Braun, H.: Anfahrt und Anhalte-Vorgänge von Linien-Omnibussen, in Der Verkehrsunfall, Heft 3, März 1978
- /4/ Wobben, D., Schulte, L.-E.; Untersuchungen zur CO₂-Emission von Nutzfahrzeugen; Ausrollversuche zur Ermittlung der Fahrwiderstandskurven bei Nutzfahrzeugen und Bussen nach Emissionsstand Euro V, TÜV NORD Mobilität, Umweltbundesamt FKZ: 363 01 195, 2009
- /7/ Richtlinie 70/220/EG des Rates vom 20. März 1970 zur Angleichung der Rechtsvorschriften der Mitgliedstaaten über Maßnahmen gegen die Verunreinigung der Luft durch Emissionen von Kraftfahrzeugen, jeweils in der gültigen Fassung
- /6/ Begrenzung der CO₂-Emission von Nutzfahrzeugen, laufendes Forschungsvorhaben des Umweltbundesamtes, FKZ: 3708 45 104, Forschungsnehmer TÜV NORD Mobilität (D), TU Graz (A)
- /7/ Development and Testing of a certification procedure for CO₂ emissions and fuel consumption of HDV, Reduction and testing of Greenhouse Gas Emissions from Heavy duty vehicles LOT 2; laufendes Forschungsvorhaben Europäische Kommission, Generaldirektion (DG) Clima Action, ENV.C.3/SER/2009/0038, Forschungsnehmer TU Graz (A), TÜV NORD (D), TNO (NL), VTT (FIN) un andere
- /8/ Kies, A., Hausberger, S., Rexeis, M.; Option for a European Certification Procedure for CO₂ Reduction of Heavy Duty Vehicles; TU Graz (A), SAE 2011-01-2192, 2011
- /9/ Richtlinie 2005/55/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 28. September 2005 über die Typgenehmigung von schweren Nutzfahrzeugen und Motoren hinsichtlich ihrer Emissionen (Euro IV und V).
- /10/ Kleinebrahm, M., Schulte, L.-E., Dreger, S.; Emissionsverhalten von Linienbussen – Teil 1, Dieselantrieb mit nachgerüstetem Abgasrückführungssystem und Erdgasantrieb im Vergleich, LANUV-Fachbericht 14, Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen, Recklinghausen 2009.
- /11/ Kleinebrahm, M., Schulte, L.-E., Dreger, S.; Emissionsverhalten von Linienbussen – Teil 2, Dieselantrieb mit nachgerüstetem SCR-System kombiniert mit einem CRT-Partikelfilter, LANUV-Fachbericht 19, Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen, Recklinghausen 2009.
- /12/ Kleinebrahm, M., Schulte, L.-E., Dreger, S.; Emissionsverhalten von Linienbussen – Teil 3, Dieselantrieb mit werkseitigem Bluetec®-System mit Partikelfilter und Hochdruck-AGR mit CRT®-System im Vergleich, LANUV-Fachbericht 20, Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen, Recklinghausen 2009.

- /13/ Schulte, L.-E.; World Harmonized Duty Cycle (WHDC) Test Programme on WHDC Option No. 5, Final Report, 26th WHDC Meeting Geneva, 13th January 2009.
- /14/ Hammer, J.; Ruschmeyer, S.; Scholz-Starke, K.; Kleinebrahm, M.; Hornig, U., „Forschungsbegleitung für den Einsatz von Hybridlinienbussen im Verkehrsverbund Rhein-Ruhr“, Gemeinsamer Schlussbericht des Projektvorhaben FKZ: 03KP566 A/B/C RWTH Aachen University, TÜV Nord Mobilität, Verkehrsverbund Rhein-Ruhr, Aachen, 2011