



**Auftraggeber: Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB)**

**Projektträger: Forschungszentrum Jülich GmbH, Projektträger Jülich**

**November 2015**

Version 1.2

**Autoren:**

Dr. Michael Faltenbacher ,  
Dr. Olga Vetter  
Julian Grafetstätter  
Dr. Stefan Eckert (thinkstep)

Martin Ruhl,  
Michael Unger (BbA)

Jürgen Lange,  
Christian Soffel (VCDB)

Dr. Thoralf Knotte,  
Beate Haufe (Fraunhofer IVI)

Dr. Jan Hammer (TÜV NORD)

Kai Scholz-Starke (ika RWTH Aachen)



thinkstep

Arbeitsgemeinschaft

**Thinkstep**  
vormals PE INTERNATIONAL AG

**BbA – Dr. Bruns & Fetzer**  
**Unternehmensberatung GmbH**

**VerkehrsConsult Dresden-Berlin GmbH**

**Fraunhofer-Institut für Verkehrs- und  
Infrastruktursysteme IVI \***

**TÜV NORD Mobilität GmbH & Co. KG**

**Institut für Kraftfahrzeuge der RWTH  
Aachen University \***

Hauptstraße 111 – 113  
70771 Leinfelden – Echterdingen

Phone +49 711 341817 – 0  
Fax +49 711 341817 – 25

E-Mail michael.faltenbacher@thinkstep.com

Internet [www.thinkstep.com](http://www.thinkstep.com)

Mit \* gekennzeichnete Partner sind Unterauftragnehmer

## Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis .....	3
Abbildungsverzeichnis .....	6
Tabellenverzeichnis .....	9
Nomenklatur .....	11
Zusammenfassung .....	12
1 Einleitung .....	27
2 Ziel und Vorgehensweise .....	28
2.1 Zielstellung .....	28
2.2 Projektinhalte .....	28
2.3 Zeitplan .....	30
3 Fahrzeuge und teilnehmende Verkehrsbetriebe .....	32
4 Datenerfassung und –auswertung .....	40
5 Bewertung Inbetriebnahme und Linienbetrieb der Hybridbus-Kleinflotten (AP 2) .....	42
5.1 Zielsetzung und Vorgehensweise .....	42
5.2 Ergebnisse Inbetriebnahme und Linienbetrieb .....	42
5.2.1 Technische Zuverlässigkeit der Dieselhybridbusse (thinkstep/VCDB) ...	45
5.2.2 Technische Zuverlässigkeit Ladeinfrastruktur (thinkstep/VCDB) .....	56
5.2.3 Inbetriebnahme / technischer Herstellersupport / Ersatzteile (VCDB) ...	56
5.2.4 Kraftstoffverbrauch und Klimaschutzwirkung während des Praxisbetriebs (thinkstep) .....	64
5.2.5 Umfang rein elektrischer Betrieb / Erfahrungen aus dem Linienbetrieb (VCDB) .....	72
5.2.6 Anforderungen an Fahrer / Fahrerschulung (IVI) .....	77
5.2.7 Akzeptanz beim Personal (IVI) .....	79
6 Ermittlung der Kosten im Linienbetrieb (AP1) .....	87
6.1 Zielsetzung und Vorgehensweise .....	87
6.2 Ergebnisse .....	87
6.2.1 Fahrzeugbezogene Kosten von Hybridbussen im Vergleich zu konventionellen Dieseln (BbA) .....	87
6.2.2 Systembedingte Zusatzkosten beim Hybridbuseinsatz (BbA) .....	92
6.2.3 Ladeinfrastrukturbedingte Zusatzkosten für Plug-In-Hybride .....	94
6.2.4 Gesamtkosten (BbA) .....	94
6.2.5 Break-even-Analyse (BbA) .....	94
6.2.6 Abschätzung Umweltkosten und Integration in Gesamtkosten (thinkstep, BbA) .....	97
7 Effizienzanalyse in Abhängigkeit von Einsatzbedingungen (AP3) .....	105
7.1 Streckenanalyse (IVI, thinkstep, ika, TÜV) .....	105
7.1.1 Datengrundlage .....	105
7.1.2 Ergebnisse .....	108
7.1.3 Fazit .....	115

7.2	Analyse des Fahrereinflusses (VCDB , IVI) .....	116
7.3	Lademöglichkeiten (IVI) .....	118
7.3.1	Vorgehensweise und Annahmen .....	119
7.3.2	Vergleich mit konventionellen Dieseln .....	120
7.3.3	Vergleich mit Hybridbussen .....	121
7.3.4	Vergleich mit Batteriebusen .....	122
7.3.5	Fazit .....	123
7.4	Klimatische Bedingungen (IVI/thinkstep) .....	124
8	Erstellung eines Softwaretools zur Beschaffungsoptimierung von Nahverkehrsbusen (AP4) .....	128
8.1	Zielsetzung und Vorgehensweise (TÜV).....	128
8.2	Tooldesign und Dateninput (TÜV, BbA, thinkstep) .....	128
8.3	Datenlage (IVI, thinkstep, TÜV, ika).....	134
8.3.1	Referenzbusse mit Heizediesel.....	134
8.3.2	Referenzbusse ohne Heizediesel .....	134
8.3.3	Hybridbusse mit Heizediesel.....	135
8.3.4	Hybridbusse ohne Heizediesel.....	136
8.4	Softwareumgebung & Datenschutz (TÜV) .....	136
8.5	Toolimplementierung (TÜV) .....	137
8.6	Haftungsausschluss (TÜV) .....	137
9	Laufende Erfolgskontrolle / Monitoring (AP5) .....	138
9.1	Zielsetzung und Vorgehensweise .....	138
9.2	Ergebnisse .....	138
9.2.1	Kostenentwicklung (BbA) .....	138
9.2.2	Primärenergieeinsparung und Klimaschutz (THG) (thinkstep).....	138
9.2.3	Emissionsminderung und Fördereffizienz (TÜV NORD, thinkstep, VCDB) .....	139
10	Lösungsvorschläge und Optimierung (AP6) .....	142
10.1	Zielsetzung und Vorgehensweise .....	142
10.2	Ergebnisse .....	142
10.2.1	Ergebnisse Linienbetrieb und Vorschläge zur Unterstützung bei der Behebung technischer Probleme (VCDB).....	142
10.2.2	Empfehlungen zum optimalen Linieneinsatz (IVI) .....	144
10.2.3	Kosten des Linienbetriebs pro Kilometer (BbA) .....	145
10.2.4	Empfehlungen .....	150
11	Literaturverzeichnis .....	154
Anhang A	Grunddaten Fahrzeuge .....	156
Anhang B	Auswertungen Ausfallgründe nach Fahrzeugtyp .....	158
Anhang C	Typberichte .....	161
Anhang D	Auswertung Inbetriebnahme .....	164
Anhang E	Auswertung Ersatzteilversorgung (Hersteller).....	166
Anhang F	Auswertung Rein elektrisches Fahren .....	167

---

Anhang G Akzeptanzbefragungen .....	169
Anhang G 1 Bewertung durch die Fahrerinnen und Fahrer .....	169
Anhang G 2 Bewertung durch die Werkstattleiter .....	185
Anhang G 3 Fazit der Akzeptanzbefragungen .....	193

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Themenfelder und Bewertungskriterien des Prüfprogramms .....	12
Abbildung 2:	Übersicht der beteiligten Projekte .....	13
Abbildung 3:	Durchschnittliche Verfügbarkeit Hybridbusse je Verkehrsunternehmen / Fahrzeugtyp (inkl. Dieselsebusse) .....	15
Abbildung 4:	Kraftstoffverbräuche der Hybridbusse im Vergleich zu Dieselreferenzbussen .....	17
Abbildung 5:	Treibhausgase – bisher erzielte Einsparungen und Einsparpotenzial .....	17
Abbildung 6:	Gesamtkosten Dieselhybrid- und Dieselsebusse im Vergleich .....	20
Abbildung 7:	Break-even-Verlauf für mit 35% geförderte Hybridbusse .....	20
Abbildung 8:	Gesamtkosten Solobusse (Euro V) inkl. abgeschätzter Umweltkosten (ohne Förderung) .....	22
Abbildung 9:	Ergebnisüberblick Softwaretool zur Entscheidungsunterstützung .....	23
Abbildung 10:	Themenfelder und Bewertungskriterien des Prüfprogramms .....	29
Abbildung 11:	Zusammenhang der Arbeitspakete .....	30
Abbildung 12:	Zeitplan .....	31
Abbildung 13:	Übersicht der beteiligten Projekte .....	32
Abbildung 14:	Erfasste Laufleistung Hybrid- und Dieselsebusse BMUB Prüfprogramm .....	46
Abbildung 15:	Durchschnittliche monatliche Laufleistung pro Bus je Verkehrsunternehmen .....	47
Abbildung 16:	Mittlere Verfügbarkeit der Hybridbusse und Diesel- Referenzfahrzeuge .....	48
Abbildung 17:	Durchschnittliche Verfügbarkeit der Hybridbusse je Verkehrsunternehmen .....	49
Abbildung 18:	Verfügbarkeit der Hybridbusse nach beteiligten Verkehrsunternehmen im Betrachtungszeitraum .....	49
Abbildung 19:	Ausfallgründe nach Hauptkategorien .....	50
Abbildung 20:	Ausfallgründe - Ereignisse je Fahrzeug nach Hersteller/Typ .....	51
Abbildung 21:	Ausfallereignisse nach Defektarten .....	52
Abbildung 22:	Ausfalltage nach Defektarten .....	52
Abbildung 23:	Verteilung von Schadensereignissen pro Fahrzeug nach Betriebsdauer .....	53
Abbildung 24:	Durchschnittliche Ausfallzeit pro Defektereignis nach Betriebsdauer .....	54
Abbildung 25:	Art der beanspruchten Supportleistung .....	59
Abbildung 26:	Art der Defektbehebung .....	60

Abbildung 27:	Erreichbarkeit des Supports.....	61
Abbildung 28:	Reaktionszeit des Supports .....	62
Abbildung 29:	Qualität der Problemlösung .....	63
Abbildung 32:	Treibhausgase – bisher erzielte Einsparungen und Einsparpotenzial .....	72
Abbildung 33:	Anteil rein elektrisches Fahren MAN Solo Seriell-Hybrid.....	74
Abbildung 34:	Anteil rein elektrisches Fahren bei VHH in Hamburg –Solo Parallel-Hybrid .....	75
Abbildung 35:	Zeitanteil rein elektrisches Fahren Hybridbusse, EFBEL Projekt .....	76
Abbildung 36:	Fahrzeugbezogene Kosten.....	87
Abbildung 37:	Anschaffungsmehrkosten im Vergleich.....	90
Abbildung 38:	Kraftstoffverbräuche im Vergleich.....	91
Abbildung 39:	Fahrzeugbezogene Kosten im Vergleich .....	92
Abbildung 40:	Systembedingte Zusatzkosten.....	92
Abbildung 41:	Gesamtkosten im Vergleich .....	94
Abbildung 42:	Break-even-Verlauf für Hybridbusse – ohne Förderung .....	95
Abbildung 43:	Break-even-Verlauf für mit 35% geförderte Hybridbusse .....	96
Abbildung 44:	Break-even-Verlauf für mit 25% geförderte Hybridbusse .....	96
Abbildung 46:	Break-even-Verlauf für mit 35% der Anschaffungsmehrkosten geförderte Euro V- und Euro VI-Hybridbusse inkl. Umweltkosten .....	103
Abbildung 56:	Differenzkosten pro Fahrzeugkilometer zwischen Plug-In- Hybridbussen und konventionellen Dieselnbussen .....	121
Abbildung 57:	Differenzkosten pro Fahrzeugkilometer zwischen Plug-In- Hybridbussen und Hybridbussen .....	122
Abbildung 58:	Differenzkosten pro Fahrzeugkilometer zwischen Plug-In- Hybridbussen und Batteriebusen .....	123
Abbildung 59:	Relative Kraftstoffeinsparungen von Solobussen mit seriellem Hybridantrieb und Superkondensatoren (verschiedene Linien).....	124
Abbildung 60:	Relative Kraftstoffeinsparungen von Solobussen mit parallelem Hybridantrieb und Batterien .....	125
Abbildung 61:	Relative Kraftstoffeinsparungen von Gelenkbussen mit seriellem Hybridantrieb und Batterien .....	125
Abbildung 62:	Relative Kraftstoffeinsparungen von Gelenkbussen mit leistungsverzweigtem Hybridantrieb und Batterien.....	126
Abbildung 63:	Mittelwerte über die Monatstemperaturen in verschiedenen deutschen Städten.....	126
Abbildung 64:	Eingabemaske des Softwaretools.....	129
Abbildung 65:	Ergebnisüberblick .....	130
Abbildung 66:	Ergebnisdarstellung .....	131

Abbildung 67:	Ausschnitt Bericht Seite 1 .....	132
Abbildung 68:	Ausschnitt Bericht Seite 2 .....	133
Abbildung 69:	Solobusse - Abgasemissionen EFBEL Messuntersuchungen.....	140
Abbildung 70:	Entwicklung Dieselpreis Januar 2007 bis September 2015.....	145
Abbildung 71:	Kumulierte Mehrkosten für Hybridfahrzeug im Nutzungszeitraum - ohne Förderung .....	147
Abbildung 72:	Sensitivitätsanalyse für 2017 beschaffte Busse – ohne Förderung .....	148
Abbildung 73:	Kumulierte Mehrkosten für Hybridfahrzeug im Nutzungszeitraum - mit Förderung für Busse im jeweiligen Beschaffungsjahr .....	149
Abbildung 74:	Fragen 1 u. 3 – Berufserfahrung und Erfahrung mit dem Hybridbus ...	169
Abbildung 75:	Fragen 4 u. 9 – Umstellungsschwierigkeiten und Schulungsdauer .....	170
Abbildung 76:	Frage 12 – Bewertung der Hybridbusschulung.....	171
Abbildung 77:	Frage 15 – Unterschiede im Bedienverhalten zw. Diesel- und Hybridbus.....	172
Abbildung 78:	Fragen 16 u. 17 – Wechsel zw. Diesel- und Hybridbus innerhalb eines Einsatztages.....	173
Abbildung 79:	Frage 18 – Beobachten des rein elektrischen Fahrens .....	173
Abbildung 80:	Frage 18 – Elektrisches Fahren vor und nach Haltestellen .....	174
Abbildung 81:	Frage 18 – Elektrisches Fahren vor und nach Lichtsignalanlagen .....	174
Abbildung 82:	Frage 18 – Elektrisches Fahren bei Langsamfahrt .....	174
Abbildung 83:	Fragen 19 und 37 – Bewertung des Anfahrverhaltens .....	175
Abbildung 84:	Fragen 20 und 37 – Bewertung des Beschleunigungsverhaltens.....	175
Abbildung 85:	Fragen 21 und 22 – Beschleunigungsverhalten mit u. ohne Dieselmotor.....	176
Abbildung 86:	Fragen 23 und 37 – Bewertung des Bremsverhaltens.....	176
Abbildung 87:	Frage 37 – Bewertung des sonstigen Fahrverhaltens .....	177
Abbildung 88:	Frage 37 – Bewertung des sonstigen Fahrverhaltens .....	177
Abbildung 89:	Frage 37 – Beurteilung der Handhabung und Bedienung .....	178
Abbildung 90:	Frage 37 – Beurteilung der Handhabung und Bedienung .....	178
Abbildung 91:	Fragen 26 und 27 – Bewertung der Anzeigen des Speicherzustands und der Energieeffizienz beim Fahren .....	179
Abbildung 92:	Fragen 28 und 29 – Anpassung der Fahrweise und Fahrplanflexibilität.....	180
Abbildung 93:	Fragen 30 und 32 – Bewertung der Geräusche.....	180
Abbildung 94:	Fragen 31 und 37 – Bewertung der Geräusche.....	180
Abbildung 95:	Fragen 34 und 37 – Bewertung der Vibrationen .....	181
Abbildung 96:	Fragen 35 und 37 – Bewertung der Klimatisierung.....	181
Abbildung 97:	Frage 36 – Störungen und Fehler während des Linieneinsatzes .....	182

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Übersicht der eingesetzten Hybrid--und Referenzdieselbusse.....	14
Tabelle 2:	Übersicht der Aufgabenverteilung zwischen den Partnern .....	29
Tabelle 3:	Meilensteine.....	31
Tabelle 4:	Übersicht der eingesetzten Hybridbusse .....	33
Tabelle 5:	Kurzbeschreibung der Projekte.....	34
Tabelle 6:	Übersicht Datenerfassungsbögen für Verkehrsbetriebe und Bushersteller .....	40
Tabelle 7:	Übersicht der eingesetzten Hybrid--und Referenzdieselbusse.....	43
Tabelle 8:	Übersicht der Datenverfügbarkeit je Verkehrsbetrieb .....	44
Tabelle 9:	Laufleistung der Hybridbusse je Projekt (Stand September 2015).....	46
Tabelle 10:	Sensitivitätsbetrachtung Ausfallursachen .....	51
Tabelle 11:	Auffällige Defektereignisse in der Datenerfassung .....	54
Tabelle 12:	Übersicht der bedienten Linien bei Jasper und SBG .....	65
Tabelle 13:	Einsatzcharakteristik und Kraftstoffverbrauch.....	67
Tabelle 14:	Klimaschutzwirkung durch den Einsatz der Hybridbusse .....	71
Tabelle 15:	Seminarangebot MAN ProfiDrive® 2014 .....	78
Tabelle 16:	Seminarangebot für Volvo-Hybridbusse .....	78
Tabelle 17:	Seminarangebot für Solaris-Hybridbusse .....	79
Tabelle 18:	Best Practice Schadenkostensätze im Verkehr in Deutschland .....	99
Tabelle 19:	Abgeschätzte Umweltkosten Solobusse je Fahrzeugkilometer in Deutschland.....	101
Tabelle 20:	Festlegung der Topographieklassen.....	106
Tabelle 21:	Schulungsstrategien der Verkehrsunternehmen.....	117
Tabelle 22:	Schulungsdauer und Kraftstoffeffizienz .....	118
Tabelle 23:	Getroffene Annahmen.....	120
Tabelle 24:	Vorschlag Förderszenario für Solobus.....	149
Tabelle 27:	Frage 15 – Ursachen für eine Umstellung des Bedienverhaltens.....	172
Tabelle 28:	Frage 36 – Beschreibung der Störungen und Fehler im Liniendienst.....	182
Tabelle 29:	Antworten zu den Fragen 1 bis 4.....	185
Tabelle 30:	Ausbildung des Werkstattpersonals.....	185
Tabelle 31:	Arbeiten der Werkstatt an den Hybridbussen .....	186
Tabelle 32:	Ausfallverhalten und Reparaturdauer .....	186
Tabelle 33:	Häufige Störungen und Fehler.....	187
Tabelle 34:	Technische Voraussetzungen für Wartung u. Instandhaltung .....	187
Tabelle 35:	Arbeiten mit abweichendem Arbeitsaufwand.....	188

---

Tabelle 36:	Bewertung des Herstellersupports .....	188
Tabelle 37:	Qualität des Herstellersupports.....	189
Tabelle 38:	Ersatzteilbedarf für Hybridbusse .....	190
Tabelle 39:	Ersatzteilerstellung .....	190
Tabelle 40:	Maßnahmen zur Optimierung, Updates.....	191
Tabelle 41:	Unterschiede in den Fahrzeuggenerationen.....	191
Tabelle 42:	Unterschiede in den Fahrzeuggenerationen.....	192
Tabelle 43:	Anregungen zur Weiterentwicklung der Hybridbusse .....	192

## Nomenklatur

<b>Abkürzung</b>	<b>Erläuterung</b>
AP	Arbeitspaket
BKrfQG	Berufskraftfahrer-Qualifikationsgesetzes
CO <sub>2</sub>	Kohlendioxidemissionen
EEV	Enhanced Environmentally Friendly Vehicle
KoPa II	Konjunkturpaket II der Bundesregierung
LCC	Lebenszykluskosten (Life Cycle Cost)
NaKI	Nationalen Klimaschutzinitiative
NiMH	Nickel-Metallhydrid-Batterie
NO <sub>x</sub>	Stickoxidemissionen
ÖPNV	Öffentlicher Personennahverkehr
Rwg.	Rechnungswagen
SORT	Standardised - On - Road Tests Cycles (Standardisierte Zyklen für Straßentests)
VB	Verkehrsbetriebe
VG	Verkehrsgesellschaft
VU	Verkehrsunternehmen

## Zusammenfassung Endbericht

### Einleitung

Das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB) fördert im Rahmen der Nationalen Klimaschutzinitiative (NaKI) die Anschaffung von diesel-elektrischen Hybridbussen im öffentlichen Personennahverkehr. Diese Förderung knüpft an das abgeschlossene Programm „Hybridbusse für einen umweltfreundlichen Nahverkehr“ an und umfasst die Beschaffung von 58 Diesel-Hybridbussen durch 6 Verkehrsbetriebe. Die aktuelle Förderung wird ebenso wie das bereits abgeschlossene Programm mit einem umfassenden Prüfprogramm begleitet, das den Einsatz der Busse hinsichtlich ökologischer, ökonomischer und technischer Kriterien untersucht (siehe Abbildung 1).



Abbildung 1: Themenfelder und Bewertungskriterien des Prüfprogramms

### Ziele

Die Ziele des Prüfprogramms im Einzelnen sind die Ermittlung der Betriebskosten von Hybridbussen einschließlich des Vergleichs mit den Betriebskosten von modernen konventionellen Dieselmotoren an den verschiedenen Einsatzorten (AP 1). Ein weiterer Arbeitsschwerpunkt ist die Bewertung der Inbetriebnahme und des laufenden Betriebs der Hybridbus-Kleinflotten (AP 2) sowie die Effizienzanalyse in Abhängigkeit von den Einsatzbedingungen (AP 3). Möglicherweise identifizierte Optimierungspotenziale und Lösungsvorschläge werden auf Basis der Erkenntnisse aus den Arbeitspaketen 1 bis 3 und 5 konsolidiert und im Arbeitspaket 6 zusammengeführt. Um die Beschaffung der Busflotten in Verkehrsbetrieben zu optimieren, wird in Arbeitspaket 4 ein Softwaretool erstellt, das die Verkehrsbetriebe bei der Auswahl von Antriebskonzepten unter ökologischen und ökonomischen Aspekten unterstützen soll. Grundlage des Softwaretools sind dabei die Erkenntnisse

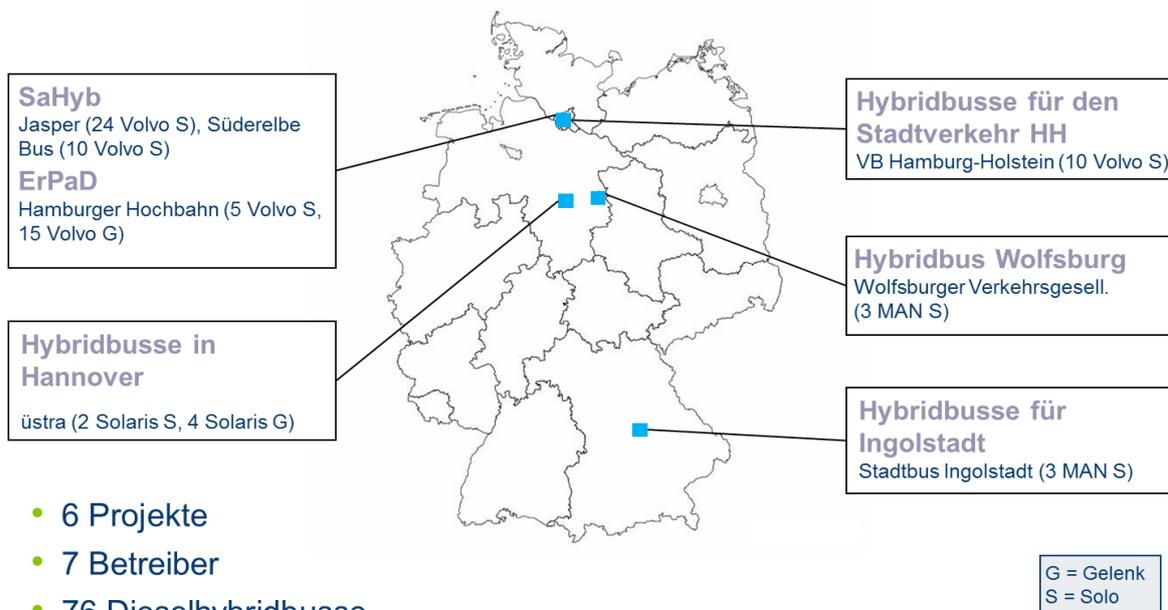
aus den technischen und wirtschaftlichen Bewertungen der unterschiedlichen Fahrzeugkonzepte in den Arbeitspaketen 1 bis 3.

### *Datengrundlage*

Der vorliegende Bericht deckt den gesamten nutzbaren Datenerfassungszeitraum des Projekts (18 Monate von März 2014 – September 2015, für 2 Verkehrsbetriebe konnten Daten für 25 Monate bereits ab September 2013 genutzt werden) ab. Da die Partner dieser Bietergemeinschaft seinerzeit bereits das begleitende Prüfprogramm zur ersten Beschaffungsinitiative des BMUB im Rahmen des Konjunkturpakets II in 2010-12 durchgeführt haben, können die Partner auf die im Vorprogramm gewonnenen Erkenntnisse und Ergebnisse aufbauen und diese nahtlos in die Fortschreibung der einzelnen Untersuchungen integrieren. So kann auf bereits etablierte Prozesse wie z.B. die Datenerfassung bei den Verkehrsunternehmen und Fahrzeugherstellern zurückgegriffen werden. Neben Grunddaten zu den Fahrzeugen werden kontinuierlich Betriebsdaten für die Hybrid- und Dieselreferenzfahrzeuge bei den Betreibern mittels monatlichen Erfassungsbögen erhoben, die dann mit Hilfe des SoFi Softwaretools ausgewertet werden. Weitere Datenerhebungen erfolgten zur Inbetriebnahme der Hybridbusse, zur Fahrerschulung und zur Bewertung der Hybridbusse durch die Fahrer sowie zum rein-elektrischen Betrieb und zur Ersatzteilverfügbarkeit aus Betreiber- und Herstellersicht. Die Zuarbeit der Verkehrsbetriebe und Hersteller war gut und ihnen gilt an dieser Stelle nochmals unser Dank, da sie maßgeblich zum Gelingen dieses Vorhabens beigetragen haben.

### *Untersuchungsrahmen*

Abbildung 2 gibt einen Überblick der im Rahmen des Prüfprogramms betrachteten Hybridbusse.



**Abbildung 2: Übersicht der beteiligten Projekte**

Die Anzahl der betrachteten Hybridbusse konnte dabei gegenüber der Anzahl der Busse die unmittelbar gefördert werden erhöht werden, da die Verkehrsbetriebe Jasper und SBG alle ihre Hybridbusse in die Datenerfassung miteinbrachten. Darüber hinaus beteiligte sich

die üstra, die eine Anschaffungsförderung im vorangegangenen Förderprogramm erhalten hat, auf freiwilliger Basis ebenfalls am Prüfprogramm. Dadurch konnte die Anzahl der berücksichtigten Hybridfahrzeuge von 58 auf 76 gesteigert werden und die Datenbasis entsprechend verbreitert werden.

Seit Januar 2015 liefern alle geförderten Hybridbusse Daten. Tabelle 1 gibt einen Überblick über die sich in der Datenerfassung befindlichen Hybrid- Dieselreferenzbusse und den Erfassungszeitraum. Alle Busse entsprechen mindestens der Euro V NORM. Die 20 Hybridbusse der Hochbahn und 7 Hybridbusse von Jasper entsprechen der Euro VI Abgasnorm, die Dieselreferenzbusse bei der Hochbahn und in Wolfsburg (WVG) ebenfalls.

**Tabelle 1: Übersicht der eingesetzten Hybrid--und Referenzdieselbusse**

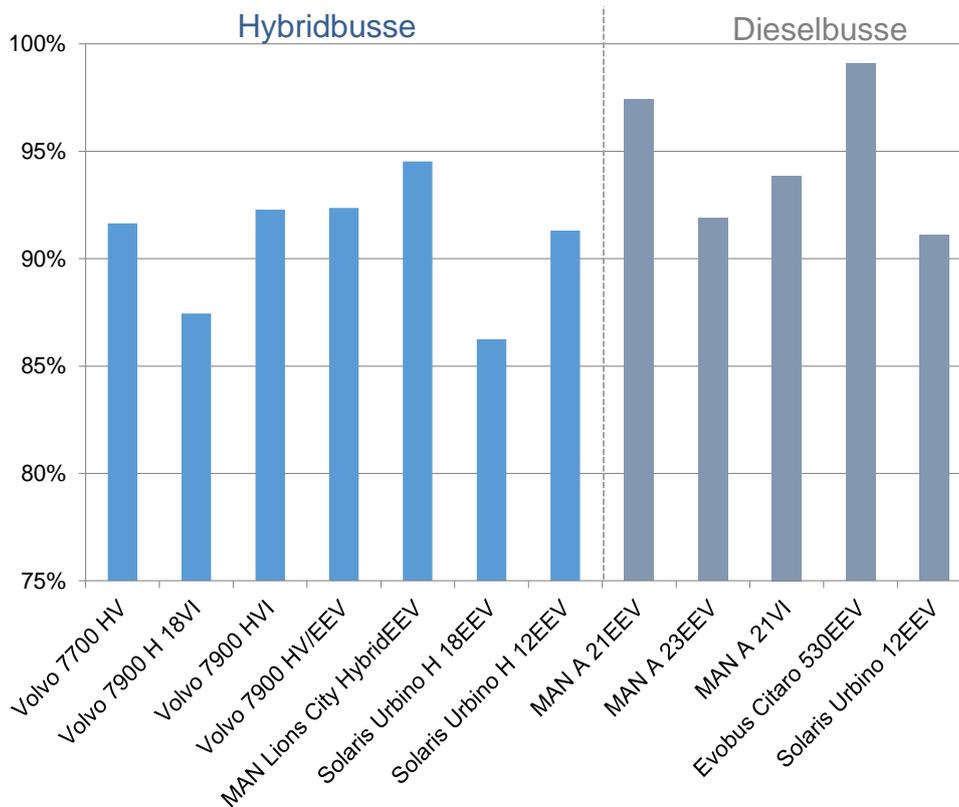
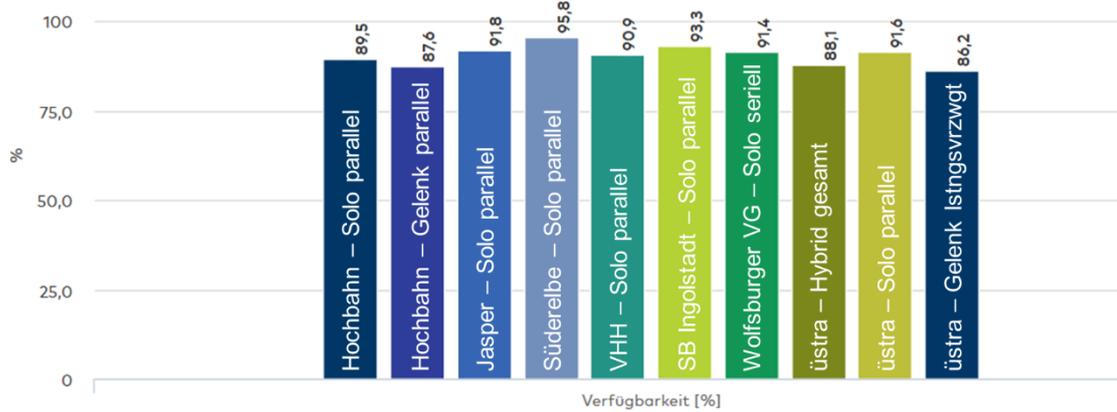
Verkehrsbetrieb	Anzahl Fzg.	Hersteller	Typ	Art	Verkehrsbetrieb	Anzahl Fzg.	Hersteller	Typ	Art
<b>HHA</b>	5* 15*	Volvo	7900 H	Solo Gelenk	<b>WVG</b>	3	MAN	Lion's City Hybrid	Solo
	1* 2*	EvoBus	Citaro	Solo Gelenk		1*	MAN	Lion's City	Solo
<b>Jasper</b>	7 10 7*	Volvo	7700 H 7900 H 7900 H	Solo	<b>üstra</b>	2 4	Solaris	Urbino H12 Urbino H18	Solo Gelenk
	7	EvoBus	Citaro	Solo		2 3	Solaris MAN	Urbino A23	Solo Gelenk
<b>SBG</b>	5 5	Volvo	7700 H 7900 H	Solo	<b>SBI</b>	3	MAN	Lion's City Hybrid	Solo
	2	EvoBus	Citaro	Solo		1	MAN	A21	Solo
<b>VHH</b>	10	Volvo	7900 H	Solo					
	1	EvoBus	Citaro	Solo					

\* Busse entsprechen der Euro VI Abgasnorm

## Ergebnisse

### Verfügbarkeit

Auf Basis der erhobenen Daten kann man bei Verfügbarkeitswerten von 86 – 96% je Verkehrsunternehmen von einer Verfügbarkeit der Hybridbusse sprechen, die mindestens vergleichbar mit der Verfügbarkeit bei Einführung neuer Fahrzeugtypen im konventionellen Bereich ist (siehe Abbildung 3). Fahrzeugtyp bezogen liegt die Verfügbarkeit vergleichbar bei 87 - 94%. Bei der Darstellung nach Fahrzeugtyp ist die Abgasnorm die die Busse erfüllen jeweils als römische Ziffer mit angegeben.



**Abbildung 3: Durchschnittliche Verfügbarkeit Hybridbusse je Verkehrsunternehmen / Fahrzeugtyp (inkl. Dieselbusse)**

Eine zentrale und positive Erkenntnis ist die Entwicklung im Bereich der technischen Verfügbarkeit. Die Einsatzreife der Fahrzeuge ist um durchschnittlich zehn Prozentpunkte gegenüber der Begleitforschung zur ersten Hybridbus-Förderrichtlinie gestiegen. Die hohe Einsatztauglichkeit schlägt sich auch in der Zufriedenheit bei den meisten Verkehrsunternehmen nieder: Mehrere Betreiber befassen sich schon konkret mit Folgebeschaffungen bzw. haben diese bereits in die Wege geleitet. Es darf als Erfolg der gezielten Bundesförderung der Elektromobilität im ÖPNV gewertet werden, dass sich in diesem Verkehrsegment der Phasenübergang von der Marktvorbereitung zum Markthochlauf so deutlich dokumentiert.

Erfreulich ist die Erkenntnis, dass die innovativen Baugruppen auf den Hybridbussen, etwa die Elektrotraktion und die Traktionsenergiespeicher, vergleichsweise selten die Ursache

für Fahrzeugausfälle waren. Hybridspezifische Ausfälle im engeren Sinne, das heißt Defekte an der Elektrotraktion oder den Energiespeichersystemen, sind vergleichsweise selten, häufiger treten dagegen Probleme an den Schnittstellen des Fahrzeugantriebs auf.

Zahlreiche Fehlerursachen sind völlig unabhängig vom Hybridsystem, jedoch führen auch diese Defekte zu Unzufriedenheit mit dem Fahrzeug, die in den Verkehrsunternehmen dann mitunter subjektiv auf die Hybridtechnologie projiziert wird. Doch auch organisatorische Defizite bei den Betreibern waren gelegentlich Ursache für - auch längere - Standzeiten der Hybridbusse.

### *Verbrauch*

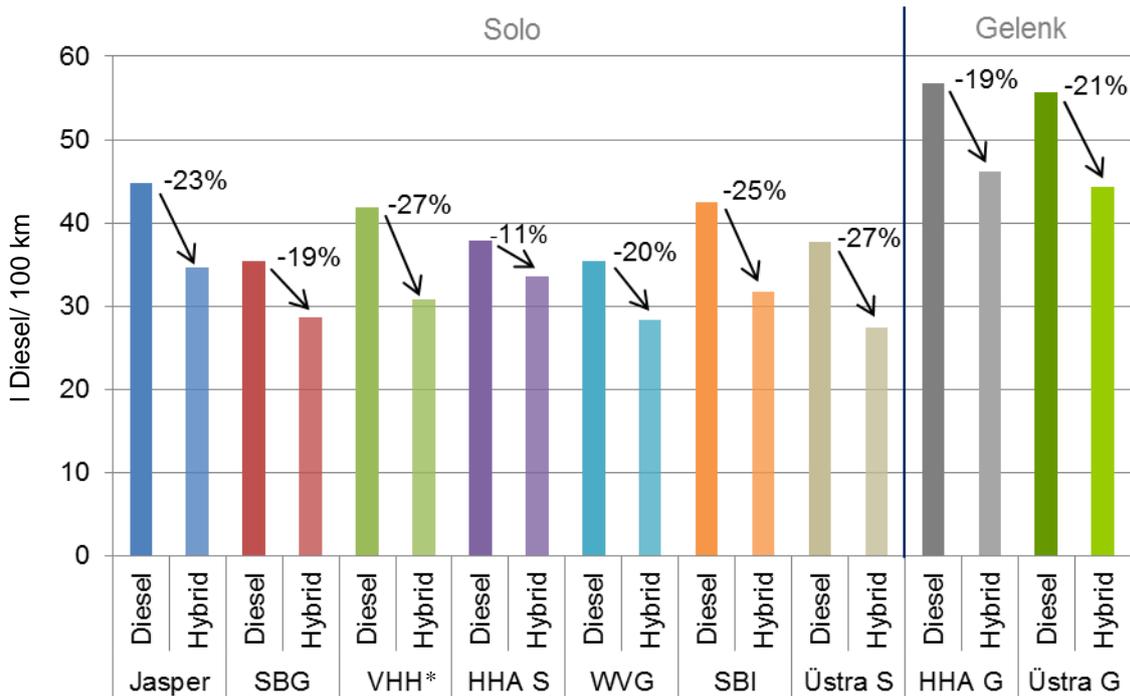
Sowohl die Hybrid- als auch die Dieselreferenzbusse werden bei den meisten Betreibern im gesamten Liniennetz bzw. auf den vom jeweiligen Betriebshof aus bedienten Linienbündeln eingesetzt. Die Vergleichbarkeit der Kraftstoffverbräuche ist aus nachvollziehbaren Weise bei einem möglichst linienreinen Einsatz am besten geben. Da dies aus betrieblichen Gründen häufig schwierig realisierbar ist, bietet die Erfassung der Verbrauchsdaten über einen längeren Zeitraum unter möglichst vergleichbaren Randbedingungen eine Alternative um eine belastbare Einschätzung der Kraftstoffeinsparungen der Hybridbusse gegenüber konventionellen Dieselnissen treffen zu können.

Im Rahmen der Begleitforschung konnten mit Ausnahme der Hybridbusse der Hochbahn, für 15 bis 25 Monate Verbrauchsdaten erfasst werden, so dass u.a. auch jahreszeitliche Einflüsse mitberücksichtigt werden konnten. Für die Hochbahnbusse konnten aufgrund ihres späteren Liefertermins Daten für zumindest 9 Monate erfasst werden. Einige Busse konnten überwiegend linienrein eingesetzt werden. Dabei handelt es sich um die Gelenkhybridbusse und ein Referenzfahrzeug der Hochbahn (mehrheitlich auf Linie 109), ein Gelenkhybrid und 1 Gelenkreferenzfahrzeug der üstra in Hannover (Linie 121) und die Solohybridbusse in Ingolstadt (überwiegend auf Linienbündel 10/11/X11). Alle in der Begleitforschung betrachteten Hybrid- und Dieselnisse entsprechen mindestens der Euro V Abgasnorm.

Im Betrachtungszeitraum wurden mit der aktuellen Fahrzeuggeneration im Praxisbetrieb Verbrauchsreduzierungen von 11 bis 27% bzw. 4,3 – 11,4 l / 100 km gegenüber den betrachteten Referenzfahrzeugen realisiert (siehe Abbildung 4). Die mittlere Einsparung über alle betrachteten Verkehrsunternehmen hinweg lag bei 22%.

Bei einem Verkehrsbetrieb (VHH) beruht der Vergleich auf reinen Fahrdieselnverbrauchsdaten der Hybrid- und Dieselnisse (ohne Heizölverbrauch der Zusatzheizung).

Im Fall der Solohybrid Fahrzeuge bei der Hochbahn, die der Euro VI Norm entsprechen, kommt ebenfalls ein Euro VI Fahrzeug als Referenzfahrzeug zum Einsatz, das mit einem Rekuperationsmodul zur Energierückgewinnung ausgestattet ist. Dieser Fahrzeugtyp weist laut Betreiberaussage gegenüber herkömmlichen Euro V Dieselnisse einen um 4-7% niedrigeren Verbrauch auf. Im Zusammenspiel mit dem Umstand, dass zum einen bisher erst Daten für 9 Monate vorliegen und zum anderen die Hybridbusse bei der Hochbahn im Stadtverkehr mit etwas niedrigeren Durchschnittsgeschwindigkeiten eingesetzt werden, ergibt sich die etwas geringere Kraftstoffeinsparung von -11% im Vergleich zu den anderen Betreibern mit Solohybridbussen.



\* Nur Fahrdieselvebrauch für Hybrid- und Dieselbusse erfasst, ohne Heizdiesel

Abbildung 4: Kraftstoffverbräuche der Hybridbusse im Vergleich zu Dieselreferenzbussen

Vermeidung von Treibhausgasen und Schadstoffemissionen

Entsprechend den bisher erzielten Laufleistungen und Verbrauchseinsparungen wurden mit dem neunmonatigen bis zweijährigen Betrieb ca. 580.000 l Diesel eingespart bzw. eine Klimaschutzwirkung von ca. 1.700 t vermiedenen Treibhausgasen (in CO<sub>2</sub> Äquivalenten) erzielt (siehe Abbildung 5). Über ihren gesamten Lebenszyklus (üblicherweise 12 Jahre) werden die geförderten Busse voraussichtlich 13.600 t Treibhausgase bzw. 4,7 Mio. Liter Diesel Kraftstoff einsparen.

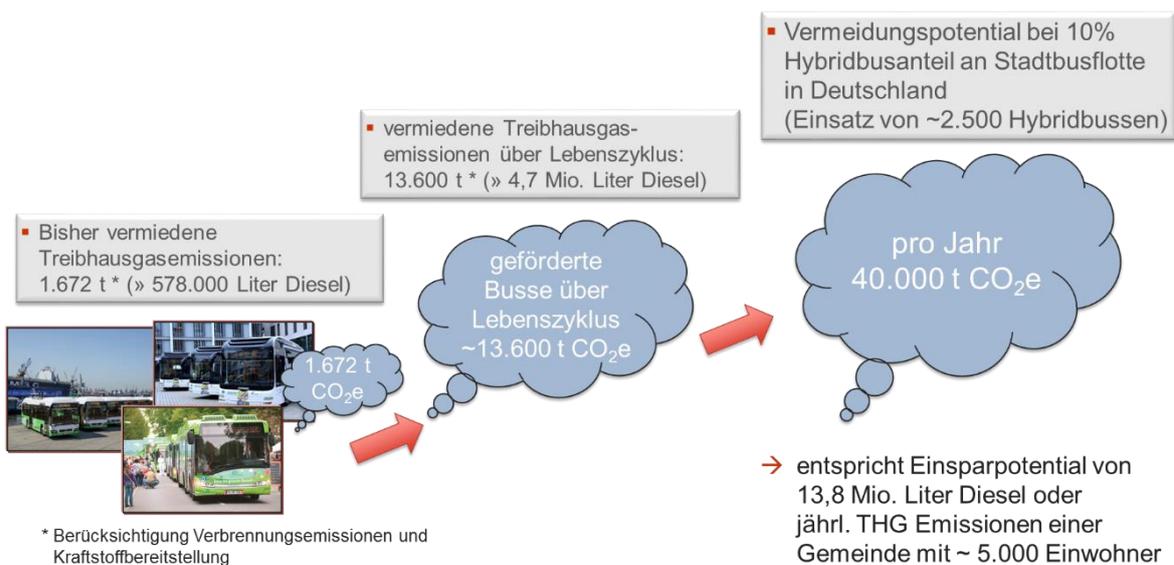


Abbildung 5: Treibhausgase – bisher erzielte Einsparungen und Einsparpotenzial

Das Potenzial der Technologie lässt sich anhand einer überschlägigen Abschätzung veranschaulichen. Unterstellt man einen Anteil von 10 % Hybridbussen an der Stadtbusflotte in Deutschland, ergibt sich ein jährliches Einsparpotenzial von ca. 40.000 t CO<sub>2</sub>e oder den Treibhausgasemissionen einer Gemeinde mit 5.000 Einwohnern.

Bei den Schadstoffen zeigen die Hybridbusse ebenfalls ein erhebliches Reduktionspotenzial. Beispielweise weisen die Euro V Solo-Hybridbusse bei den Stickoxid (NO<sub>x</sub>) Emissionen eine Reduktion im Bereich 43-51% gegenüber den konventionellen Dieselreferenzbussen, die den EEV Abgasstandard erfüllen, auf und liegen damit bereits auf Euro VI Niveau. Für einen Euro VI Hybridbus lag die Reduktion der NO<sub>x</sub>-Emissionen bei 96% gegenüber den Dieselreferenzbussen mit EEV Standard

#### *Einflussparameter auf Kraftstoffverbrauch*

Die Hybridbuskonzepte der einzelnen Hersteller weisen unterschiedliche Ergebnisse bzgl. der Kraftstoffeinsparung gegenüber konventionellen Dieseln aus. Als Eignungskriterien lassen sich, basierend auf den vorhandenen Daten, die Topographie einer Linie sowie die auf ihr gefahrenen mittleren Reisegeschwindigkeiten benennen. Dabei überwiegt der Einfluss der Topographie, speziell der Anteil sog. kritischer Steigungen (lang anhaltende stärkere Steigungen), während der Einfluss der Reisegeschwindigkeit als geringer zu bewerten ist.

Ein Vergleich der mittleren Monatstemperaturen unterschiedlicher deutscher Städte zeigte, dass der maximale Unterschied in den Wintermonaten in etwa zwei bis drei Kelvin beträgt. In Abhängigkeit von der Hybridtechnologie und Linie kann das zu Mehr- bzw. Mindereinsparungen von etwa 5 %-Punkten führen. Über das gesamte Jahr hinweg werden diese Unterschiede jedoch wieder weitgehend ausgeglichen, insbesondere dann, wenn der Bus nicht mit einer Klimaanlage ausgestattet ist. Insofern ist zu erwarten, dass der Einfluss der Streckencharakteristik auf die Kraftstoffeinsparungen die Auswirkungen unterschiedlicher klimatischer Bedingungen innerhalb von Deutschland bei weitem übersteigt. Lediglich für höher gelegene Städte, in denen noch dazu eine anspruchsvollere Topographie zu erwarten ist, können sich diese Effekte spürbar überlagern. Unabhängig vom Lokalklima kann jedoch eine Optimierung des Heizungskonzepts für den Fahrgastraum zu weiteren Kraftstoffeinsparungen führen.

Ein Einfluss zwischen Fahrerschulung und Kraftstoffeinsparungen konnte anhand der vorliegenden Daten nicht dargestellt werden, da ein Bezug zwischen Fahrer bzw. Fahrergruppe und Kraftstoffverbrauch nicht möglich war. Jedoch wurden von den länger geschulten Fahrern weniger Schwierigkeiten beim Umstieg auf den Hybridbus benannt. Ein Vergleich der Kraftstoffeffizienz zwischen Unternehmen, die gleichartige Hybridbusse einsetzen, die Fahrer aber unterschiedlich ausbildeten, lässt zwar einen Zusammenhang vermuten, jedoch werden auch in einem Unternehmen, das nur eine Kurzeinweisung durchführte, große Einsparungen erzielt.

#### *Anteil rein elektrisches Fahren*

Bei den Volvo- und MAN-Fahrzeugen ist zeitweise ein rein elektrischer Fahrbetrieb möglich. Diese Option beeinflusste bei den meisten Betreibern die Systementscheidung für einen Bus mit Hybridantrieb, auch wenn sie nur in einem Fall konkreter Baustein des angestrebten

Verkehrskonzepts und daher bindendes Vergabekriterium war. Bei den Verkehrsunternehmen herrscht grundsätzlich ein hoher Aufklärungsgrad über die Konzeption und die Einsatzmöglichkeiten von Hybridbussen. Es zeichnet sich ab, dass der Hybridbus eine Option für Segmente in der Elektromobilität darstellt, in denen der vollelektrische Bus derzeit noch nicht bestehen kann. Ein Potenzial bietet hierbei die Kombination von Dieselmotor und elektrischem Antrieb mit externer Nachlademöglichkeit als Plug-In-Hybrid. Möglicherweise wird sich das Einsatzspektrum des Hybridbusses tendenziell aus den Kernstädten hinaus in die Peripherie verlagern, bzw. in der Kombination verschiedener Einsatzanforderungen zu finden sein.

### *Herstellersupport*

Beim Thema Kundendienst und After Sales erkennt man bei den meisten Betreibern eine wechselhafte Zufriedenheit bezüglich Erreichbarkeit, Reaktionszeit und Qualität des Herstellersupports. Bei zwei Herstellern werden sowohl die Reaktionszeit als auch die Qualität der Problembehebung zu jeweils über 50 Prozent der Fälle bemängelt. Die Verkehrsunternehmen nutzen überwiegend die klassischen Angebote des Herstellersupports, nämlich Vertragswerkstätten und Servicemonteur.

### *Fahrerakzeptanz*

An der Akzeptanzbefragung nahmen 143 Personen teil. Die eingegangenen Antworten zeigen einen klaren Zusammenhang zwischen der Ausbildungsintensität und dem Verständnis für das Hybridfahrzeug. Fahrer, die eine mehrstündige Einweisung erhalten hatten, empfanden die Umstellung auf den Hybridbus in der Regel als nicht schwierig. Im Gegensatz dazu gab rund ein Drittel des Fahrpersonals, das nur kurz oder gar nicht unterwiesen wurde, Schwierigkeiten bei der Umstellung an. Aus den Rücksendungen geht weiterhin hervor, dass die Fahrer die Ziele der Hybridtechnik befürworten. Das zeigen insbesondere die Hinweise zur Weiterentwicklung der Technologie. Hier zählen längeres rein elektrisches Fahren, durchgängig elektrischer Betrieb während der Haltestellenaufenthalte sowie eine noch effizientere Kraftstoffnutzung zu den Wünschen.

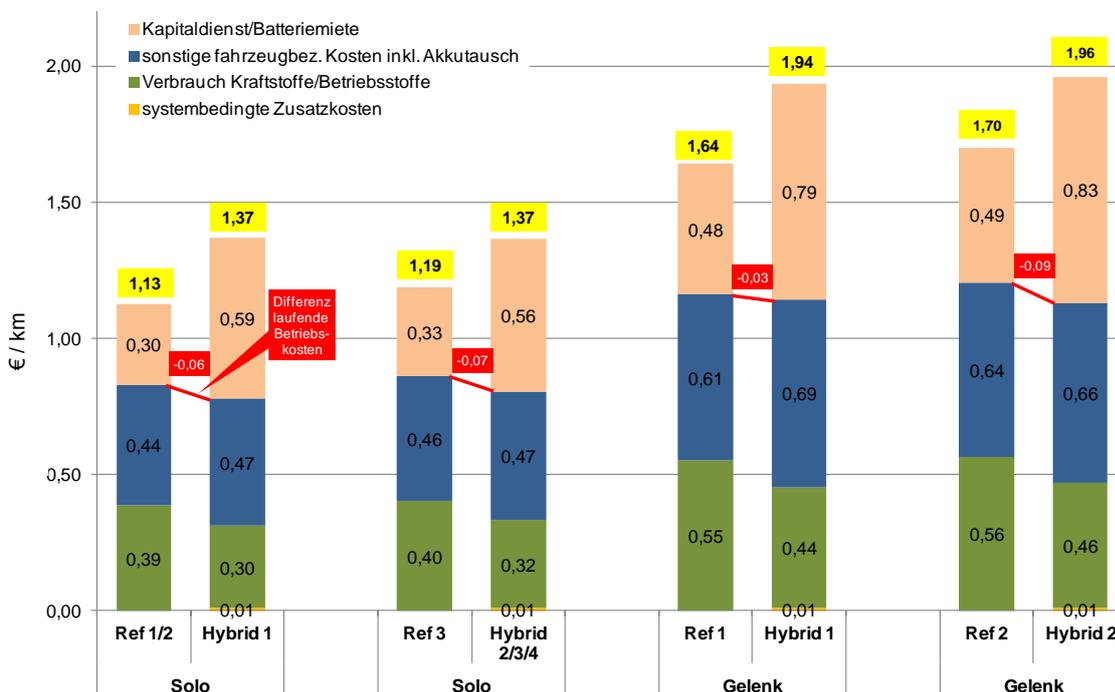
Anfahr- und Beschleunigungsverhalten werden teilweise als langsamer als beim Dieselmotor empfunden und deshalb im Hinblick auf Fahrplanteue und Sicherheit kritisiert. Hingegen werden gleichzeitig ruckfreies Beschleunigen und Bremsen geschätzt.

Weitere Anregungen der Fahrer beziehen sich auf die Gestaltung des Fahrerplatzes (Anordnung und Einheitlichkeit der Anzeige- und Bedienelemente, Übersichtlichkeit, Größe und Sicherheit der Ablagen). Typabhängig werden Geräusche und Vibrationen als geringer und angenehmer empfunden. Hinsichtlich der Gestaltung des Arbeitsplatzes und der Geräuschkulisse ist bei der zwischenzeitlich neu eingeführten Fahrzeuggeneration eine größere Zufriedenheit zu verzeichnen.

### *Wirtschaftlichkeit*

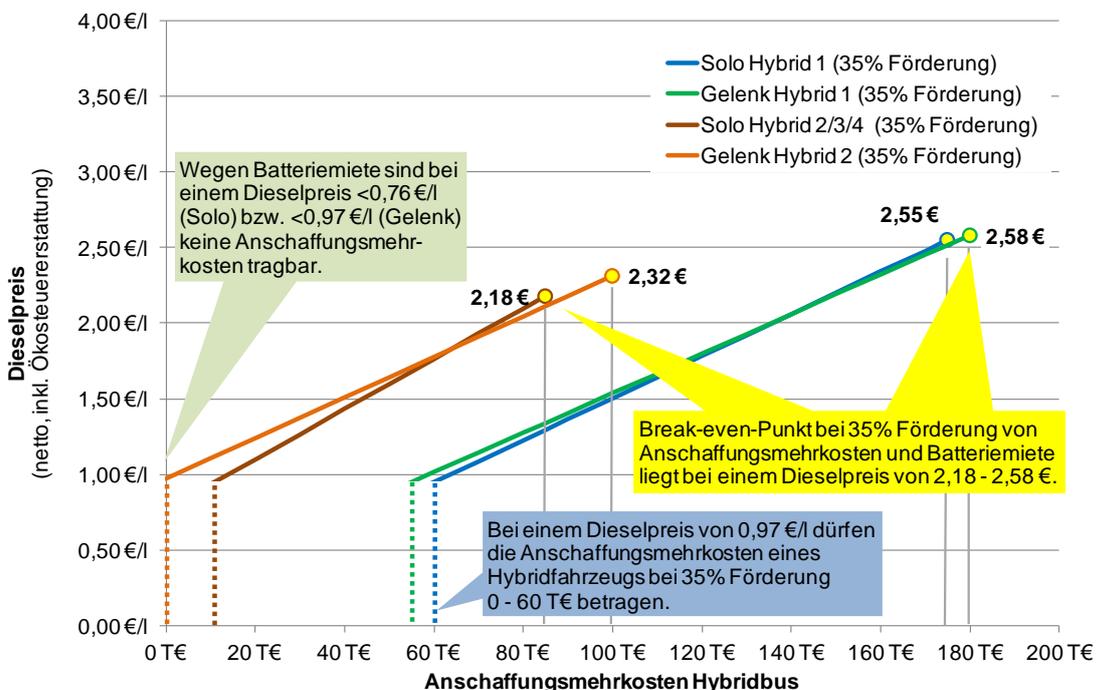
Zur Ermittlung der Wirtschaftlichkeit wurde das Kostenmodell aus dem vorangegangenen Begleitprogramm in Abstimmung mit den beteiligten Verkehrsbetrieben fortgeschrieben und aktualisiert. Insgesamt ist festzustellen, dass sich die Mehrkosten der Hybridfahrzeuge gegenüber der Situation 2011/2012 reduziert haben. So betragen damals die Mehrkosten bei

den Solobussen ca. 27 ct/km (jetzt: 18-24 ct/km) und bei den Gelenkbussen 42 ct/km (jetzt: 26-30 ct/km).



**Abbildung 6: Gesamtkosten Dieselhybrid- und Dieselbusse im Vergleich**  
(normiert auf 60 Tkm p.a. und Nutzungsdauer 12 Jahre, ohne Förderung)

Abbildung 7 stellt die Kostenäquivalenz zwischen mit 35% der Anschaffungsmehrkosten geförderten Hybridbussen und konventionellen Dieselbussen in Abhängigkeit von den Anschaffungsmehrkosten und dem Dieselpreis (inkl. Ökosteuererstattung) dar:



**Abbildung 7: Break-even-Verlauf für mit 35% geförderte Hybridbusse**

als Funktion des Dieselpreises und der Anschaffungsmehrkosten bei der realisierten Kraftstoffeinsparung vs. Diesel-Referenz (normiert auf 60 Tkm p.a. und Nutzungsdauer 12 Jahre)

Bei einem aktuellen Dieselpreis von 0,97 €/l Diesel dürften die Anschaffungsmehrkosten je nach Hybridbustyp 0 – 60 T€ betragen, damit der jeweilige Hybridbus vergleichbare Lebenszykluskosten wie ein konventioneller Dieselbus aufweist. Während bei einem Dieselpreis von 1,50 €/l die Mehrkosten ca. 40 – 100 T€ betragen dürfen, liegen die gegenwärtigen Break-even-Werte der vier betrachteten Hybridbustypen bei 2,18 – 2,58 €/l Diesel.

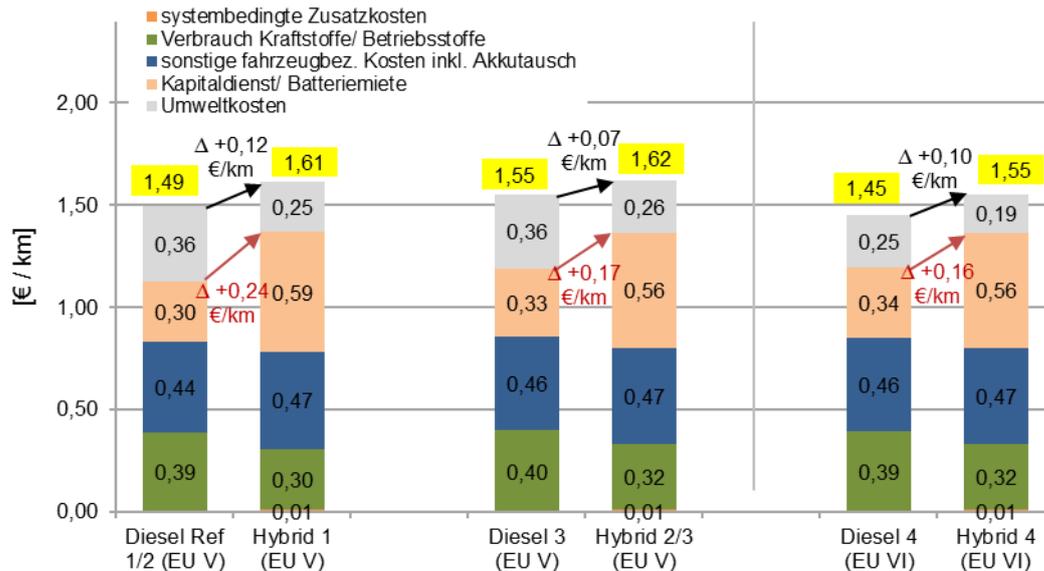
Die gleiche Betrachtung ohne Berücksichtigung einer Förderung der Anschaffungsmehrkosten führt unter den heutigen Rahmenbedingungen zu einer Kostenäquivalenz erst bei Dieselpreisen von 3,20 bzw. 3,70 €/l.

Analog ergeben sich bei einer um 5%-Punkte höheren Kraftstoffeinsparung, d.h. 25% statt 20% relative Kraftstoffersparnis und 35% Förderung der Anschaffungsmehrkosten, Break-even-Punkte, die im Mittel ca. 0,47 € ( $\pm 0,04$  €) je l Diesel niedriger liegen als die in Abbildung 7 dargestellten Werte. Dies ergibt, abhängig vom jeweiligen Hybridbustyp, eine Kostenäquivalenz zum konventionellen Dieselbus bei einem Dieselpreis im Bereich von ca. 1,75 – 2,09 €/l.

Insgesamt ist festzustellen, dass sich in allen Fällen die heutigen Anschaffungsmehrkosten für Hybridfahrzeuge (ggf. inkl. Batteriemiete) auch bei einer Förderung der Anschaffungsmehrkosten von 35% erst bei teilweise deutlich höheren Kraftstoffkosten amortisieren.

#### *Einbeziehung der Umweltkosten*

Die Förderung der Einführung von Hybridbussen stellt eine umweltpolitische Maßnahme dar, die eine Verringerung der volkswirtschaftlichen Kosten für Gesundheit und Umwelt gerade in städtischen Ballungsräumen in Gegenwart und Zukunft zum Ziel hat. Um Kosten und Nutzen dieser Maßnahme möglichst ganzheitlich zu bewerten, ist eine Berücksichtigung der Umweltkosten sinnvoll. Wie die Abbildung 6 zeigt, erhält das Verkehrsunternehmen bzw. der Fahrgast über eine rein betriebswirtschaftliche Betrachtung kein positives Signal, die Umwelt sparsamer zu nutzen. Über die Einbeziehung von Umweltkosten finden die mit Kosten bewerteten externen Effekte, die sich aus dem Verzehr an unserer Umwelt und potenziellem Schaden an der menschlichen Gesundheit ergeben, Eingang in eine möglichst vollständige Gesamtkostenbetrachtung. Basierend auf der vom Umweltbundesamt erarbeiteten Methodenkonvention 2.0 zur Schätzung von Umweltkosten können diese am Beispiel der Solobusse abgeschätzt werden:



**Abbildung 8: Gesamtkosten Solobusse (Euro V) inkl. abgeschätzter Umweltkosten (ohne Förderung)**

Lag die Differenz bei einer rein betriebswirtschaftlichen Betrachtung noch bei 24 bzw. 18 €-cent/km für die Euro V Hybride, beträgt sie unter Berücksichtigung der abgeschätzten Umweltkosten noch 12 bzw. 7 €-cent/km. Aufgrund der strengeren Abgasgrenzwerte der Euro VI Norm und der damit einhergehenden niedrigeren Umweltkosten reduziert sich die Differenz der Gesamtkosten für den Euro VI Hybrid in etwas geringerem Umfang von 16 auf 10 €-cent/km. Prozentual betrachtet betragen bei Berücksichtigung der Umweltkosten die Mehrkosten für Hybridbusse noch 4 bis 8%, je nach Hybridbustyp.

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

Bei einer Ergänzung der 35%igen Förderung der Anschaffungsmehrkosten durch eine (bisher nicht vorgesehene) Übernahme der Umweltkosten für die untersuchten Solobusse durch die öffentliche Hand würde sich der erforderliche Kraftstoffpreis für den Break-Even-Punkt der Kosten für die Euro VI-Hybridbusse (im Vergleich zu konventionellen Euro VI-Diesel-Bussen) von 3,20 bzw. 3,70 €/l Diesel auf 1,33 bzw. 1,77 €/l Diesel reduzieren; für Euro V-Fahrzeuge liegen die Werte bei 0,85 bzw. 1,23 €/l Diesel.

Da allerdings auch unter Berücksichtigung der Umweltkosten aktuell ein gesamtwirtschaftlicher Kostennachteil der Hybridbusse – zumal mittlerweile nur noch Euro VI-Busse erhältlich sind – verbleibt, erscheint die derzeit insgesamt erforderliche Förderung primär als Anschubfinanzierung für eine Übergangszeit gerechtfertigt. Die Hersteller bleiben aufgefordert, durch Reduzierung des Preisniveaus und/oder der Kraftstoffverbräuche die bestehende Wirtschaftlichkeitslücke der Hybridbusse zu schließen.

### Software Tool für Entscheidungsunterstützung bei Beschaffung

Zur Nutzbarmachung der Ergebnisse der Arbeitspakete 1 bis 3 wurde ein Softwaretool entwickelt, das dem Anwender (Verkehrsunternehmen) in einfacher Form die Möglichkeit gibt, basierend auf einer Beschreibung der jeweiligen Einsatzrandbedingungen, erste indikative Empfehlungen für Beschaffungsvorhaben zu generieren.

Die Auswertung erfolgt im Vergleich zum Referenzfahrzeug und unter Berücksichtigung der vom Nutzer festgelegten Gewichtungsfaktoren für die vier Kenngrößen Energieeffizienz, Gesamtkosten, elektrische Reichweite und Geräuschemissionen.

Die Ergebnisdarstellung umfasst eine Ergebnisübersicht (siehe Abbildung 9), weitere Detailansichten zu den antriebskonzeptbezogenen Ergebnissen, sowie Hintergrundinformationen zu den genutzten Daten und Berechnungsgrundlagen.

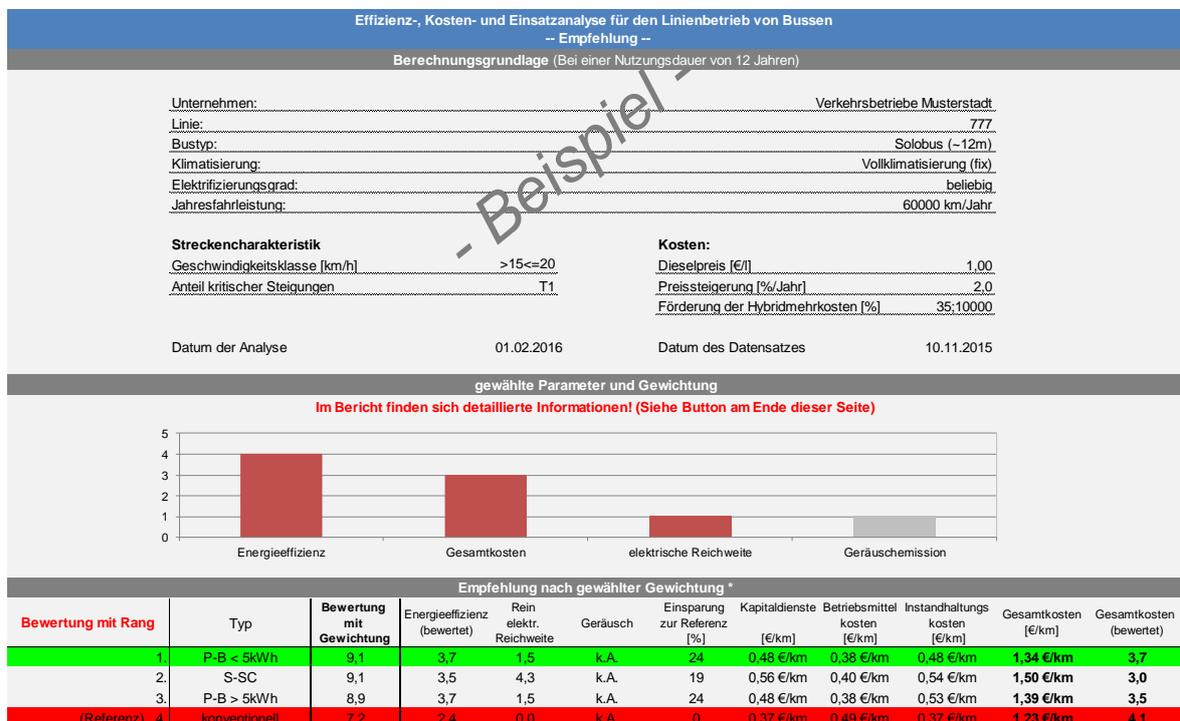


Abbildung 9: Ergebnisüberblick Softwaretool zur Entscheidungsunterstützung

### Empfehlungen

Das Prüfprogramm „Effizienz-, Kosten- und Einsatzanalyse für den Linienbetrieb von Diesel-Hybridbussen“ wurde für drei Zielgruppen durchgeführt:

- BMUB als Auftrag- bzw. Fördermittelgeber,
- Verkehrsunternehmen und
- Fahrzeughersteller.

Entsprechend können Empfehlungen für diese Zielgruppen aus den durchgeführten Untersuchungen abgeleitet werden.

### *Fördermittelgeber*

Mit Blick auf die gegenüber dem Vorgängerprüfprogramm um durchschnittlich 10 % höhere Verfügbarkeit und die mehrheitlich über 20% liegende Kraftstoffeinsparung kann das Hybridbusförderprogramm des BMUB als wirksames Instrument zur Marktstimulation für diese Technologie angesehen werden. Durch die Schaffung einer fortgesetzten Nachfrage nach der noch jungen Hybridantriebstechnik konnte diese weiter entwickelt und damit ein wesentlicher Beitrag zur Erlangung der Marktreife geleistet werden. Nicht zuletzt auch im Hinblick auf die Brückenfunktion für weitere rein-elektrische Antriebstechnologien stellt die Hybridantriebstechnik eine innovative Möglichkeit dar, Treibhausgase und Schadstoffemissionen im busbasierten ÖPNV wirksam zu mindern. Um auf den bisher erzielten Erfolgen aufzubauen und die dargestellten Potenziale, z.B. jährliches Einsparpotenzial von 40.000 t Treibhausgasen bei einem Anteil der Hybridbusse von 10% an der deutschen Stadtbusflotte, mit Hilfe einer stärkeren Marktdurchdringung zu heben, wird eine Fortsetzung der Förderung der Beschaffung von Hybridbussen empfohlen.

Entsprechend den Ergebnissen dieses Prüfprogramms zeigt sich, dass speziell die Wirtschaftlichkeit bei den aktuellen Randbedingungen (Stichwort Dieselpreis und Mehrkosten Fahrzeuganschaffung) nicht gegeben ist, selbst bei einer Berücksichtigung der Umweltkosten. Während die Dieselpreispreise nicht unmittelbar beeinflussbar sind, kann über eine Förderung der Mehrkosten (Anschaffung und ggf. Energiespeichermiete) die Wirtschaftlichkeitslücke zumindest teilweise geschlossen werden. Um nicht zuletzt den Fördermittelbedarf in Grenzen zu halten, bietet sich eine im zeitlichen Verlauf angepasste Förderung der Mehrkosten an. Dies motiviert einerseits Verkehrsbetriebe, die zeitnah die neue Technologie einsetzen wollen mit einer höheren Förderung und stellt andererseits auch einen Anreiz für die Hersteller dar, weiter an einer Reduktion gerade der Anschaffungsmehrkosten zu arbeiten, da letztlich nur so eine für den dauerhaften Erfolg der Technologie erforderliche Marktdurchdringung erreicht werden kann.

Im Sinne einer Erfolgs- bzw. Effektivitätskontrolle der eingesetzten Fördermittel wird darüber hinaus empfohlen, den Einsatz der geförderten Busse wiederum mit einem Prüfprogramm zu begleiten. Denn nur über die im Rahmen eines solchen Prüfprogramms durchgeführten Langzeitdatenerfassung und Analysen zu Bewertungskriterien wie Verfügbarkeit, Energieeffizienz und Wirtschaftlichkeit inkl. Bestimmung der Umweltkosten, lassen sich die Wirkungen der eingesetzten Busse ganzheitlich quantifizieren und bewerten.

Im Hinblick auf den weiter zunehmendem Reifegrad der rein elektrischen Komponenten sind auch vollelektrische Bussysteme inzwischen in Reichweite und werden absehbar nicht mehr als reine F&E-Vorhaben mit Einzelfahrzeugen im Markt vertreten sein. Es wird daher vorgeschlagen neben der bereits erfolgten Berücksichtigung der Plug-In-Hybridbussen einschließlich der zugehörigen Ladeinfrastruktur eine Erweiterung der Förderung auch auf vollelektrische Busse zu prüfen.

Es darf als Erfolg der gezielten Bundes-Förderung der Elektromobilität im ÖPNV gewertet werden, dass sich in diesem Verkehrsegment der Phasenübergang von der Marktvorbereitung zum Markthochlauf so deutlich dokumentiert.

Wichtig ist es nun, den Verkehrsunternehmen, die in hartem Wettbewerb stehen und gleichzeitig Garanten für öffentlichen Verkehr im Rahmen der Daseinsvorsorge sind, auch für die

kommenden Herausforderungen das nötige Rüstzeug mitzugeben, um den Innovationpfad der Elektromobilität weiter zu beschreiten und zu gestalten.

### *Verkehrsunternehmen*

Die vorliegenden Ergebnisse des Begleitprüfprogramms belegen die teilweise erheblichen Einsparpotenziale der Technologie hinsichtlich Kraftstoffverbrauch, Treibhausgasen und Schadstoffen gegenüber konventionellen Dieselnbussen und die damit verbundene Reduktion der schädlichen Folgen für Mensch und Umwelt. Ergebnisse anderer Studien zeigen weiterhin eine signifikante Reduzierung der Lärmemissionen auf.

Die durchgeführten Analysen zeigen aber auch, dass vor dem Einsatz von Hybridbussen grundsätzlich geprüft werden sollte, ob die ausgewählten Linien bzw. das Liniennetz signifikante Kraftstoffeinsparungen erwarten lassen bzw. auf welchen Linien diese am größten sind.

Als Eignungskriterien lassen sich, basierend auf den vorhandenen Daten, die Topographie einer Linie sowie die auf ihr gefahrenen mittleren Reisegeschwindigkeiten benennen. Dabei überwiegt, mit Ausnahme der Parallelhybride mit Batterie, der Einfluss der Topographie: Speziell ein hoher Anteil längerer ununterbrochener Steigungs- und Gefällestrrecken mit stärkerer Neigung, sog. kritischer Steigungen, wirkt sich ungünstig aus. Demnach ist ein vorteilhafter Einsatz von Hybridbussen auf Linien mit den Topografieklassen T1 bis T2, d.h. Linien ohne bzw. mit einem niedrigen Anteil an längeren und steileren Steigungen, zu erwarten. Parallelhybride können nach den bisher verfügbaren Daten auch bei anspruchsvollerer Topografie (T3) gute Einsparungen erzielen. Weiterhin sind tendenziell höhere Einsparungen auf Linien mit niedrigeren durchschnittlichen Reisegeschwindigkeiten erzielbar, wobei hier im Einzelfall zwischen den verschiedenen Antriebstechnologien zu differenzieren ist. Das im Rahmen des Begleitprogramms entwickelte Softwaretool zur Beschaffungsoptimierung von Nahverkehrsbusen dient hier als Orientierungshilfe für interessierte Verkehrsunternehmen und liefert dem Anwender erste Anhaltspunkte hinsichtlich z.B. zu erwartender Kraftstoffeinsparungen und Betriebskosten.

Die Verfügbarkeit der Hybridbusse ist mittlerweile annähernd vergleichbar mit der Verfügbarkeit von konventionellen Dieselnbussen. Im Hinblick auf die Verfügbarkeit von hybridspezifischen Ersatzteilen ist im Einzelfall noch mit einer längeren Lieferzeit zu rechnen, wobei gegenüber dem Vorgängerbegleitprogramm eine Verbesserung der Ersatzteilverfügbarkeit zu beobachten ist.

Während sich für die Inbetriebnahme von Hybridbussen keine höheren Aufwendungen für den Betreiber abzeichnen, ist für eine möglichst reibungslose Einführung der Technologie in den Betriebsablauf eine enge Abstimmung mit dem Fahrzeughersteller ratsam. Dies schließt die Abstimmung der Schulung des Fahr- und Wartungspersonals explizit mit ein. Gerade hinsichtlich der Akzeptanz der neuen Technologie im Unternehmen zeigen die bisherigen Erfahrungen, dass die Durchführung von dezidierten Schulungen die Akzeptanz positiv beeinflusst. Insbesondere im Hinblick auf die Erreichung optimaler Ergebnisse hinsichtlich Kraftstoffeinsparung, d. h. energieeffizientem Fahren, wirken sich umfassende Schulungsmaßnahmen positiv aus.

### *Bushersteller*

Aus Herstellersicht gilt es, die Wettbewerbsfähigkeit der Hybridtechnologie weiter zu verbessern, da nur so die Technologie mittel- und langfristig erfolgreich am Markt bestehen und mit ihr eine Marktdurchdringung in relevantem Umfang erzielt werden kann.

Hier bedarf es zusätzlicher Anstrengungen zur weiteren Reduktion der Mehrkosten des Fahrzeuges sowie einer weiteren Steigerung der Energieeffizienz. Die Gesamtkostenbetrachtungen des Begleitprogramms können als Anhaltspunkt für einen möglichen Zielkorridor für die Fahrzeugmehrkosten dienen. Dieser liegt bei aktueller 35%iger Förderung der Anschaffungsmehrkosten – abhängig vom Finanzierungsmodell des Energiespeichers und dem aktuellen Kraftstoffpreis – bei etwa 0 bis 60 T€, zzgl. etwaiger, vom Betreiber ggf. als noch akzeptabel erachteter Mehrkosten. Selbst bei zusätzlicher Berücksichtigung der vermiedenen externen Umweltkosten wäre noch eine Reduzierung der Fahrzeugmehrkosten um mindestens 30% erforderlich: Die Berücksichtigung der Umweltkosten reduziert zwar die Kostendifferenz merklich, nichtsdestotrotz sind die betriebswirtschaftlichen Mehrkosten zunächst einmal vom Busbetreiber aufzubringen. Nicht zuletzt die vermiedenen Umweltkosten rechtfertigen die aktuelle (Teil-)Förderung durch die öffentliche Hand; bis zu welchem Grad die vermiedenen Umweltkosten gegebenenfalls eine noch höhere Förderung durch die öffentliche Hand ermöglichen, bleibt abzuwarten. Die Erlangung der Wettbewerbsfähigkeit ist daher möglichst unabhängig von eventuellen (Zusatz)Förderungen zu realisieren, da die Technologie mittelfristig voraussichtlich mit reduzierter bzw. ohne Förderung auskommen muss.

Im Hinblick auf die Verfügbarkeit bieten sich herstellereinspezifisch noch Potenziale, um die technische Zuverlässigkeit weiter zu verbessern, gerade im Bereich der nicht unmittelbar hybridantriebsbezogenen Ausfallgründe. Hier empfiehlt es sich für die Hersteller, die aufgetretenen Probleme genauer zu analysieren und entsprechende Gegenmaßnahmen in der Produktion nachfolgender Fahrzeuge zu veranlassen. Die weitere Verbesserung der Ersatzteilverfügbarkeit, speziell bei den Hybridantriebskomponenten inkl. der nun elektrisch angetriebenen Hilfsaggregate ist ebenfalls der Steigerung der Verfügbarkeit dienlich.

Verbesserungspotenziale scheinen für einige Hersteller noch im Bereich der After-Sales-Betreuung und im technischen Kundendienst zu bestehen, wobei dies keine explizit hybridbezogenen Probleme sein müssen.

Als weitere zukünftige Entwicklungsaufgabe empfiehlt sich eine (vom Fahrpersonal gewünschte) vereinheitlichte Signalisierung hybrid spezifischer Eigenschaften (Speicherinhalt, effizientes Fahren) in das Anzeigekonzept des Fahrer Arbeitsplatzes. Darüber hinaus gilt es, die vom Fahrpersonal beobachteten Einschränkungen im Anfahr- und Beschleunigungsverhalten bei parallelen und seriellen Solobussen zu minimieren oder im Idealfall zu eliminieren.

## 1 Einleitung

Das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB) fördert im Rahmen der Nationalen Klimaschutzinitiative (NaKI) die Anschaffung dieselektrischer Hybridbusse im öffentlichen Personennahverkehr. Die Förderprojekte werden durch das Programm „Effizienz-, Kosten- und Einsatzanalyse für den Linienbetrieb von Diesel-Hybridbussen“ begleitet.

Das Programm knüpft an die Voruntersuchungen des begleitenden Prüfprogramms im Rahmen der „Effizienz- und Kostenanalyse für den Linienbetrieb von Hybridbussen“ [TÜV NORD et al., 2012] an, indem u. a. die vorhandenen Ergebnisse fortgeschrieben und auf eine breitere Datenbasis gestellt werden.

Die Bearbeitung erfolgt in Kooperation verschiedener Unternehmen bzw. Institutionen unter Federführung der thinkstep AG (vormals PE INTERNATIONAL AG). Die weiteren Partner sind BbA – Dr. Bruns & Fetzer Unternehmensberatung GmbH, VerkehrsConsult Dresden-Berlin GmbH, TÜV NORD Mobilität GmbH & Co. KG, das Fraunhofer-Institut für Verkehrs- und Infrastruktursysteme IVI und das Institut für Kraftfahrzeuge der RWTH Aachen University.

Kapitel 2 gibt zunächst eine Übersicht über das Ziel und die Vorgehensweise des Projekts, woraufhin in Kapitel 3 die am Programm beteiligten Regionen und Verkehrsbetriebe mit einer kurzen Projektdarstellung und den eingesetzten Fahrzeugen vorgestellt werden. Kapitel 4 gibt einen Überblick über den Prozess der Datensammlung und –auswertung. In Kapitel 5 werden zunächst die Ergebnisse der Bewertung der Inbetriebnahme und des Linienbetriebs präsentiert und darauf aufbauend im Kapitel 6 die Kosten im Linienbetrieb ermittelt. In Kapitel 7 erfolgt die Effizienzanalyse in Abhängigkeit von den Einsatzbedingungen und Kapitel 8 beschreibt die Erstellung eines Softwaretools zur Beschaffungsoptimierung von Nahverkehrsbussen. In Kapitel 9 sind die Ergebnisse der laufenden Erfolgskontrolle und des Monitorings dargestellt. Die erarbeiteten Lösungs- und Optimierungsvorschläge werden in Kapitel 10 beschrieben. Kapitel 11 schließlich umfasst die Aktivitäten im Bereich Projektmanagement und Dokumentation.

## 2 Ziel und Vorgehensweise

### 2.1 Zielstellung

Ziele des Programms „Effizienz-, Kosten- und Einsatzanalyse für den Linienbetrieb von Diesel-Hybridbussen“ sind die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung in den geförderten Verkehrsbetrieben, die Bewertung des Betriebs der Hybridbusse und die Erfassung der Klimaschutzwirkung.

Die zentralen Arbeitsinhalte des vorliegenden Programms sind:

- Die Ermittlung und der Vergleich der Betriebskosten von Hybrid, Plug-In-Hybrid- und Standardbussen bezogen auf die verschiedenen Einsatzorte und Fahrpläne;
- Die Bewertung der Inbetriebnahme und des laufenden Betriebs der Hybridbusse in den Projekten sowie das Aufzeigen von Optimierungspotenzialen;
- Die Untersuchung der Belastbarkeit der Techniken sowie das Aufzeigen von Schwachstellen und das Erarbeiten von Verbesserungsvorschlägen;
- Die Erfassung der Auswirkungen auf den Klimaschutz durch Monitoring der Treibhausgasminderung; und
- Die Bewertung der generellen streckenspezifischen Eignung und Betriebsweise von Antriebstechniken und die Entwicklung eines Softwaretools zur Entscheidungsunterstützung bei der Busbeschaffung.

Das Projekt ermöglicht so eine Quantifizierung der Ziele des Fördervorhabens und erarbeitet Empfehlungen im Hinblick auf mögliche weitere Maßnahmen zu Marktanreizen und der Erreichung der politischen Ziele (z.B. CO<sub>2</sub> Reduktionsziele), die sich aus den Erfahrungen im Verlauf des Projektzeitraums in den Regionen ableiten lassen.

### 2.2 Projekthinhalte

Für die Projektbearbeitung wurden die Arbeitsinhalte in die nachfolgenden Arbeitspakete strukturiert:

- AP 1 Ermittlung der Kosten im Linienbetrieb
- AP 2 Bewertung der Inbetriebnahme und des Linienbetriebs der Hybridbus-Kleinflotten
- AP 3 Effizienzanalyse in Abhängigkeit von Einsatzbedingungen
- AP 4 Erstellung eines Softwaretools zur Beschaffungsoptimierung von Nahverkehrsbusen
- AP 5 Laufende Erfolgskontrolle & Monitoring
- AP 6 Lösungsvorschläge und Optimierung
- AP 7 Projektmanagement und Dokumentation

Tabelle 2 zeigt die Arbeitsaufteilung der Partner in den Arbeitspaketen, wobei der jeweils federführende Partner fett gedruckt ist.

**Tabelle 2: Übersicht der Aufgabenverteilung zwischen den Partnern**

Nr.	Titel	thinkstep	BbA	VCDB	IVI	TÜV	ika
AP 1	Ermittlung der Kosten im Linienbetrieb	(x)	<b>X</b>				
AP 2	Bewertung der Inbetriebnahme und des Linienbetriebs der Hybridbus-Kleinflotten	<b>X</b>		X	(x)		
AP 3	Effizienzanalyse in Abhängigkeit von Einsatzbedingungen	(x)		(x)	<b>X</b>	(x)	X
AP 4	Erstellung eines Softwaretools zur Beschaffungsoptimierung von Nahverkehrsbussen	(x)	(x)			<b>X</b>	
AP 5	Laufende Erfolgskontrolle & Monitoring	<b>X</b>	(x)	X		X	
AP 6	Lösungsvorschläge und Optimierung		X	<b>X</b>	X		(x)
AP 7	Projektmanagement und Dokumentation	<b>X</b>	(x)	(x)	(x)	(x)	(x)

**X** federführender Partner im AP

X maßgeblich am AP beteiligter Partner

(x) in geringerem Umfang am AP beteiligter Partner

Aus den übergeordneten Programmzielen wurden zunächst die zu betrachtenden Themenfelder Praxistauglichkeit und Einsatzreife, Effizienz, Ökologie und Klimaschutz sowie Wirtschaftlichkeit und Akzeptanz abgeleitet, die sich entsprechend in den Arbeitspaketen wiederfinden. Für jedes Themenfeld wurden dann spezifische Indikatoren bzw. Kriterien entwickelt, anhand derer die quantitative bzw. qualitative Bewertung erfolgt (Abbildung 10).

**Abbildung 10: Themenfelder und Bewertungskriterien des Prüfprogramms**

Grundlage der Bewertung sowie des Monitorings bildet die Erfassung von Betriebs- und Fahrdaten der eingesetzten Busse. Diese erfolgt mit Hilfe der Software SoFi als zentraler Datenerfassungsplattform. Die erfassten Daten werden zur Auswertung des Kraftstoffverbrauchs und der resultierenden Klimaschutzwirkung herangezogen und bilden die Grundlage der techno-ökonomischen Bewertung des Linienbetriebs der Hybridbusse. Die Daten zur Streckencharakteristik sowie zu klimatischen Bedingungen des Buseinsatzes werden mit den erhobenen Betriebsdaten verknüpft, um mögliche Zusammenhänge zu identifizieren und daraus Optimierungsmöglichkeiten abzuleiten. Für die laufende Erfolgskontrolle werden einerseits die Treibhausgas- und Schadstoffeinsparungen durch den Hybridbus-einsatz verfolgt, andererseits finden Auswertungen zu durchgeführten Optimierungsmaßnahmen (z.B. Fahrerschulungen zum Thema „Kraftstoff sparendes Fahren“) statt. Abbildung 11 veranschaulicht die Projektstruktur und die Zusammenhänge zwischen den Arbeitspaketen unter Einsatz von SoFi.

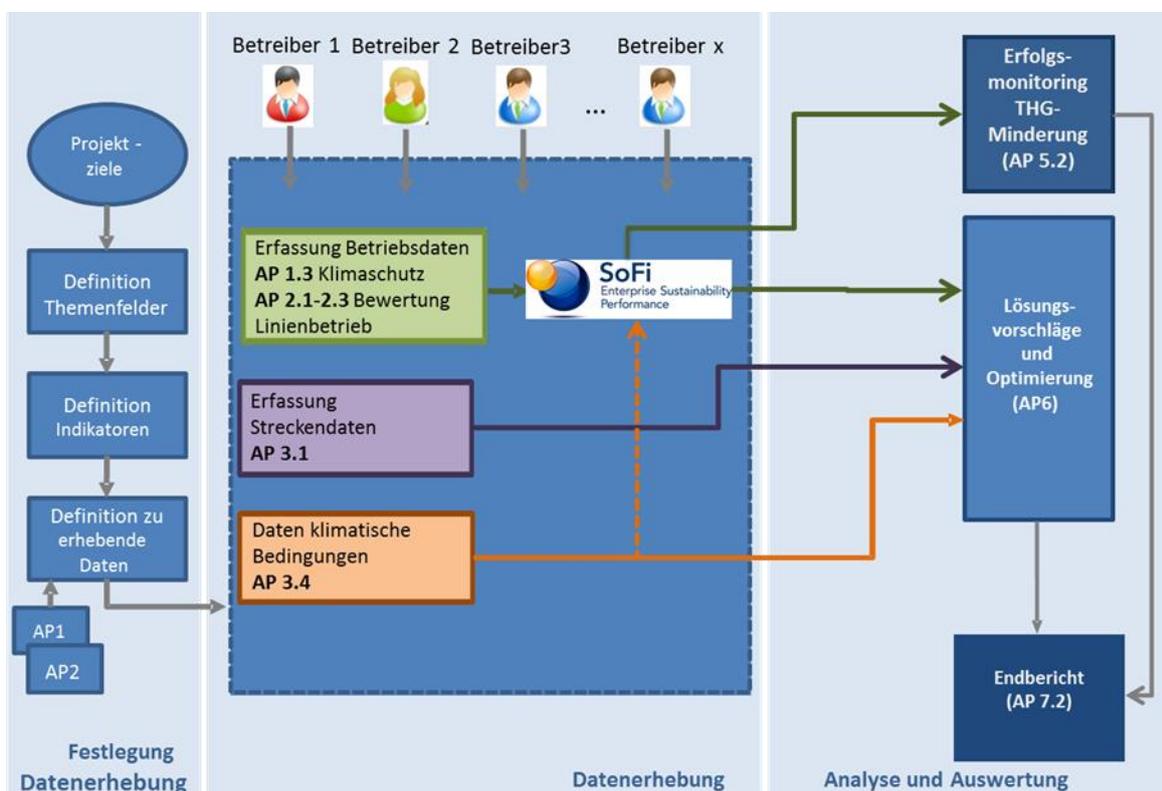


Abbildung 11: Zusammenhang der Arbeitspakete

### 2.3 Zeitplan

Das Programm hat eine Laufzeit von 23 Monaten, beginnend am 12.12.2013. Die Projektlaufzeit endet somit am 30.11.2015. Für die Bearbeitung war der in Abbildung 12 dargestellte Zeitplan vorgesehen, der so auch umgesetzt werden konnte. Die in Tabelle 3 genannten Meilensteine dienen zur Fortschrittskontrolle und wurden alle erreicht.

Projektmonate	2014												2015												
	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N		
<b>AP 1 Ermittlung der Kosten im Linienbetrieb (BbA)</b>	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x								x	x	
1.1 Fahrzeugbez. Kosten von Hybridbussen im Vergleich zu konv. Dieselmotoren	x	x	x	x	x								x	x	x								x	x	
1.2 Systembedingte Zusatzkosten beim Hybridbuseinsatz	x	x	x	x	x								x	x	x								x	x	
1.3 Ermittlung Kraftstoffverbrauch & Klimaschutzwirkung während Praxisbetrieb	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	M7			
<b>AP 2 Bewertung der Inbetriebnahme und des Linienbetriebs der Hybridbus-Kleinflotten (PE)</b>	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	
2.1 Technischen Zuverlässigkeit Hybridbusse	x	M2	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	
2.2 Technischen Zuverlässigkeit Ladeinfrastruktur	x	M2	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	
2.3 Inbetriebnahme/ techn. Herstellersupport/ Ersatzteile	x	M2	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	
2.4 Umfang rein elektr. Betrieb/ Erfahrungen aus Linienbetrieb		x	x	x							x	x											x		
2.5 Anforderungen an Fahrer / Fahrerschulung		x											x	x	x	x									
2.6 Akzeptanz beim Personal					x	x	x	x	x	x															
<b>AP 3 Effizienzanalyse in Abhängigkeit von Einsatzbedingungen (IVI)</b>	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x							x	x	x
3.1 Streckenanalyse		x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x													
3.2 Fahreranalyse					x	x	x	x	x	x	x	x													
3.3 Lademöglichkeiten																							x	x	
3.4 Klimatische Bedingungen											x	x	x	x	x	x	x								
<b>AP 4 Erstellung eines Softwaretools zur Beschaffungsoptimierung von Nahverkehrsbusen (TUV NORD)</b>					x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x								
4.1 Tooldesign					x	x	x	x	x	x	M4														
4.2 Toolimplementierung											x	x	x	x	x										
<b>AP 5 Laufende Erfolgskontrolle/ Monitoring (PE)</b>					x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	
5.1 Kostenentwicklung					x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	
5.2 Primärenergieeinsparung, Emissionsminderung (THG)					x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	
5.3 Emissionsminderung (Schadstoffe/ Lärm) und Fördereffizienz					x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	
<b>AP 6 Lösungsvorschläge und Optimierung. (VCDB)</b>					x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x							x	x	
6.1a Vorschläge zur Behebung technischer Probleme					x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x							x	x	
6.2 Empfehlungen für optimalen Linieneinsatz													x	x	x	x							x	x	
6.3 Kostenentwicklung des Linienbetriebs																								x	
6.4 Dokumentation durchgeführter Maßnahmen																							x	x	
6.5 Ausblick & Entwicklung																							x	x	
<b>AP 7 Projektmanagement und Dokumentation (PE)</b>					x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	
7.1 Projektmanagement inkl. -treffen					M1	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	
7.2 Dokumentation & Berichterstattung													x	x	M8									x	M9

Abbildung 12: Zeitplan

Tabelle 3: Meilensteine

Meilenstein	Beschreibung	AP	verantwortlich	Monat	Status
M1	Kickoff Treffen	7.1	thinkstep	1	OK
M2	Definition von Evaluationsparametern für SoFi in AP 2	2	thinkstep/VCDB	2	OK
M3	1. Zwischenbericht	7.2	thinkstep, alle	5	OK
M4	Softwaretool-Design und -struktur abgeschlossen	4.1	TNM	10	OK
M5	Streckenanalysen abgeschlossen	3.2	IVI	12	OK
M6	Bereitstellung Daten Kraftstoffverbrauch	1.3	thinkstep	16	OK
M7	2. Zwischenbericht	7.2	thinkstep, alle	15	OK
M8	Abschlussbericht	7.2	thinkstep, alle	23	OK

Der Ergebnisse des Projektes werden jeweils in den nachfolgenden Kapiteln dargestellt.

### 3 Fahrzeuge und teilnehmende Verkehrsbetriebe

Die geförderten Hybridbusse werden in verschiedenen Städten und Regionen eingesetzt. Folgende Verkehrsbetriebe partizipieren derzeit im Prüfprogramm bzw. sind dafür vorgesehen:

- Hamburger Hochbahn AG (HHA);
- Friedrich Jasper Rund- und Gesellschaftsfahrten GmbH, Hamburg, mit zwei Betriebshöfen in Horn (Jasper H) und in Mühlendamm (Jasper M);
- Süderelbe Bus GmbH, Hamburg (SBG);
- Verkehrsgesellschaft Hamburg-Holstein AG (VHH);
- Wolfsburger Verkehrs-GmbH (WVG);
- üstra Hannoversche Verkehrsbetriebe AG (üstra); und
- Stadtbus Ingolstadt GmbH (SBI).

In den Betrieben kommen Hybrid-Solo- und Gelenkbusse der Hersteller Volvo, Solaris und MAN zum Einsatz. Als Referenzfahrzeuge dienen Dieselbusse von EvoBus, Solaris und MAN. Insgesamt sind bei den sieben Verkehrsbetrieben die Daten von 93 Bussen, (76 Hybrid<sup>1</sup> und 17 Dieselfahrzeuge) erfasst und ausgewertet worden. Abbildung 13 gibt einen Überblick über die beteiligten Verkehrsbetriebe und die jeweils eingesetzten Dieselhybridbusse, deren technische Daten in Tabelle 4 zusammengefasst sind. Die einzelnen Hybridbus-Projekte werden in Tabelle 5 jeweils kurz vorgestellt.

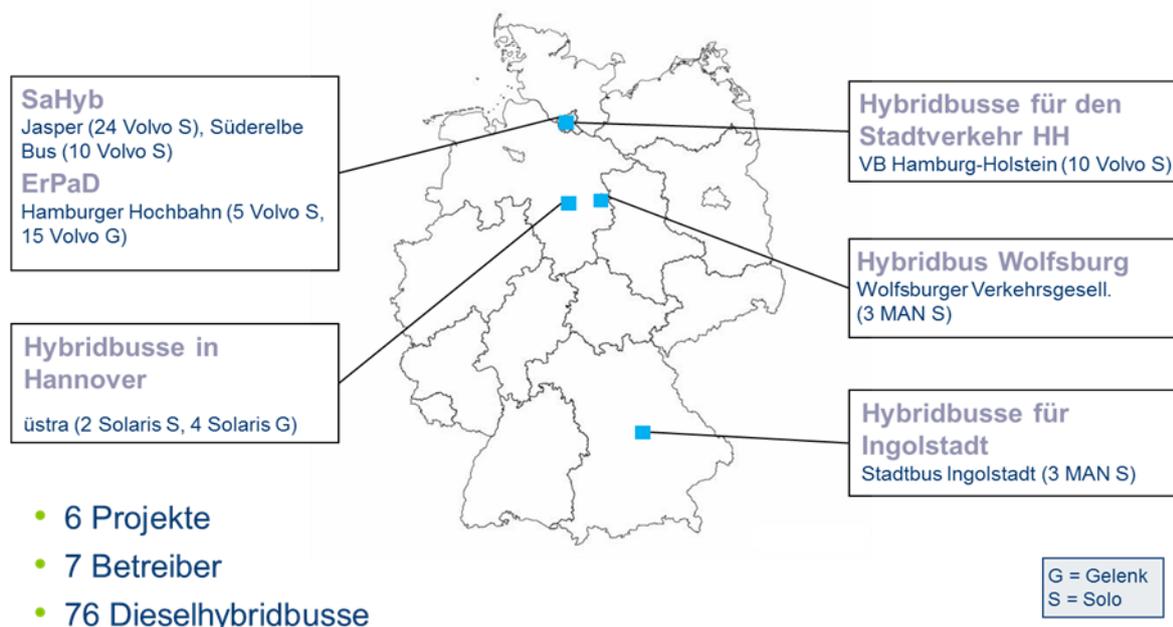


Abbildung 13: Übersicht der beteiligten Projekte

<sup>1</sup> Davon sind 58 Hybridbusse über die Nationale Klimaschutzinitiative (NKI) gefördert.

Tabelle 4: Übersicht der eingesetzten Hybridbusse

					
<b>Hersteller</b>	Volvo	Volvo	MAN	Solaris	Solaris
<b>Bustyp</b>	Solobus	Gelenkbus	Solobus	Solobus	Gelenkbus
<b>Hybridtechnologie</b>	parallel	parallel	seriell	parallel	leistungs-verzweigt
<b>Antriebsleistung Dieselmotor</b>	177 kW	177 kW	184 kW	162 kW	181 kW
<b>Antriebsleistung elektrischer Motor</b>	120 kW	150 kW	150 kW	26 kW Dauer 44 kW kurzfristig	2 x 75 kW
<b>Energiespeichertyp</b>	Lithium-Ionen-Akkuzellen	Lithium-Ionen-Akkuzellen	Ultracaps	Lithium-Ionen-Akkuzellen	Nickel-Metallhydrid-Batterie
<b>Energieinhalt</b>	4,8 kWh	9,6 kWh	ca. 0,4	5,1 kWh	11,2 kWh
<b>Anzahl Fahrzeuge (Euro Norm)</b>	42 (27 Euro V / 10 EEV / 5 Euro VI)	15 (Euro VI)	6 (EEV)	9 (EEV)	20 (EEV)
<b>Einsatz in (Anzahl Fahrzeuge, Verkehrsbetrieb)</b>	Hamburg (24 Jasper, 10 SBG, 10 VHH, 5 Hochbahn)	Hamburg (Hochbahn)	Ingolstadt, (3) Wolfsburg (3)	Hannover	Hannover

Tabelle 5: Kurzbeschreibung der Projekte

Hamburg	
<b>Projekttitlel</b>	Erprobung von sauberen parallelen Dieselhybridbussen in Hamburg (SaHyb)
<b>Organisation</b>	Friedrich Jasper Rund- und Gesellschaftsfahrten GmbH, Hamburg
<b>Busse</b>	<p>7 Volvo 7700 H 12 m und 17 Volvo 7900 H 12 m parallele Dieselhybridbusse (Jasper)</p> <p>5 Volvo 7700 H 12 m und 5 Volvo 7900 H 12 m parallele Dieselhybridbusse (SBG)</p> <p>Inbetriebnahme: Juni 2011 – November 2014</p>
<b>Inhalt</b>	<p>Erprobung im Echtbetrieb im SORT 1- und SORT 2-Gebiet</p> <p>Ermittlung Kraftstoffeinsparung im Vergleich zu herkömmlichen Fahrzeugen</p> <p>Ermittlung Standzeiten</p>
<b>Partner</b>	<p>Friedrich Jasper Rund- und Gesellschaftsfahrten GmbH – Einsatz der Busse im Betrieb</p> <p>Süderelbe Bus GmbH – Einsatz der Busse im Betrieb</p> <p>Volvo Busses – Herstellung der Busse</p>

<b>Hamburg</b>	
<b>Projekttitel</b>	Erprobung paralleler Dieselhybridbusse bei der Hamburger Hochbahn AG (ErPaD)
<b>Organisation</b>	Hamburger Hochbahn AG
<b>Busse</b>	<p>5 Volvo 7900 H 12 m parallele Dieselhybridbusse  15 Volvo 7900 H 18 m parallele Dieselhybridbusse</p> <p>Inbetriebnahme: Dezember 2014</p>
<b>Inhalt</b>	<p>Erprobung im Echtbetrieb im SORT 1- und SORT 2-Gebiet</p> <p>Bewertung hinsichtlich der Einsatz- bzw. Ausfallzeiten und der Treibstoffverbräuche zum Nachweis der technischen Leistungsfähigkeit sowie der Verringerung der Abgasemissionen</p> <p>Überprüfung von Linienprofilen auf Zusammenwirken mit der Hybridtechnologie (Verbrauch etc.)</p> <p>Information der Öffentlichkeit über Ziele und Ergebnisse des Erprobungsvorhabens insbesondere hinsichtlich der positiven Effekte für den Umwelt- und Klimaschutz</p>
<b>Partner</b>	Hamburger Hochbahn AG

Hamburg	
<b>Projekttitlel</b>	Hybridbusse für den Stadtverkehr Hamburg
<b>Organisation</b>	Verkehrsbetriebe Hamburg-Holstein AG
<b>Busse</b>	10 Volvo 7900 H 12 m parallele Dieselhybridbusse
	Inbetriebnahme: Dezember 2013
<b>Inhalt</b>	<p>Einsatz von 10 Hybrid-Linienbussen im Stadtgebiet Hamburg unter Echtbedingungen.</p> <p>Erfassung der Betriebsdaten einschließlich Kraftstoffverbräuche, Akzeptanzanalysen bei Fahrgast und Fahrer, Erfassung des Instandhaltungsaufwandes und der Verfügbarkeit der KOM</p>
<b>Partner</b>	<p>Hamburger Hochbahn AG</p> <p>Volvo (Instandsetzung)</p>

<b>Hannover</b>	
<b>Projekttitlel</b>	Hybridbusse in Hannover
<b>Organisation</b>	üstra Hannoversche Verkehrsbetriebe AG
<b>Busse</b>	20 Solaris Urbino H18 Gelenk-Hybridbusse mit leistungsverzweigtem Dieselhybridantrieb 9 Solaris Urbino H12 Gelenk-Hybridbusse  Inbetriebnahme: Gelenk Hybrid (18m): 1 Fzg in 2008 (Euro V), 10 Fzge in 2011 (EEV, Ko-Förderung durch BMU), 9 Fzge (EEV) in Oktober 2013, davon 4 in Langzeitdatenerfassung ab April 2014  Solo Hybrid (12m): 9 Fzge in Oktober 2013, davon 2 in Langzeitdatenerfassung ab April 2014
<b>Inhalt</b>	Linieneinsatz der Gelenkbusse auf einer auserwählten „Hybridbuslinie“ (Linie 121) sowie netzweiter Einsatz Netzweiter Einsatz der Solo-Hybridbusse, mit Schwerpunkt auf SORT 3 Linien Öffentlichkeitsarbeit zur Akzeptanzsteigerung Verstärkung der bereits bestehenden Hybridbusflotte Datenerfassung der Betriebs- und Havariedaten Akzeptanzbefragung von Fahrern und Werkstattpersonal
<b>Partner</b>	Solaris Allison Eaton

<b>Wolfsburg</b>	
<b>Projekttitel</b>	Hybridbus Wolfsburg – WVG elektrisiert Wolfsburg
<b>Organisation</b>	Wolfsburger Verkehrs - GmbH
<b>Busse</b>	3 MAN Lions City Hybrid 12 m serielle Dieselhybridbusse Inbetriebnahme: Juli 2014
<b>Inhalt</b>	Erprobung von Hybridbussen im Linienbetrieb im Vergleich zu konventionellen Dieselbussen
<b>Partner</b>	-

<b>Ingolstadt</b>	
<b>Projekttitlel</b>	Hybridbusse für Ingolstadt
<b>Organisation</b>	Stadtbus Ingolstadt GmbH
<b>Busse</b>	3 MAN Lion's City Hybrid 12 m serielle Dieselhybridbusse Inbetriebnahme: September 2013
<b>Inhalt</b>	AP 1: Projektmanagement AP 2: Fahrzeugbeschaffung/Inbetriebnahme AP 3: Betrieb AP 4: Werkstatt AP 5: Öffentlichkeitsarbeit
<b>Partner</b>	Audi AG - assoziierter Partner, Kooperation im Bereich Marketing/Öffentlichkeitsarbeit

## 4 Datenerfassung und –auswertung

Für die Bearbeitung der einzelnen Arbeitspakete ist es erforderlich unterschiedliche Daten und Informationen sowohl bei den Verkehrsbetrieben als auch bei Herstellern zu erfassen. Dies geschieht in zentralisierter und abgestimmter Weise über thinkstep.

Die zu erfassenden Daten beinhalten zum einen einmalige Informationsabfragen, zum anderen eine regelmäßige und kontinuierliche Erfassung von Daten (z.B. tägliche Einsatzdaten, Abfragen zu Instandhaltungsaufwendungen). Hierzu wurden von den Partnern entsprechende Datenerfassungsbögen für die einzelnen Arbeitspakete erarbeitet, die von thinkstep gebündelt versendet wurden. Die von den Verkehrsbetrieben bzw. Busherstellern ausgefüllten Fragebögen werden von den für die jeweiligen Arbeitspakete zuständigen Partnern ausgewertet. Dabei kommt gerade für die kontinuierlich erfassten Daten für AP 1 bis 3 die webbasierte SoFi-Software zum Einsatz. Neben einer zentralisierten Datenspeicherung und -verwaltung erlaubt SoFi auch die quantitative Auswertung der Daten mittels vielfältiger Filter- und Auswahlmöglichkeiten und die grafische Darstellung der Analysen mittels unterschiedlicher Grafiken. Darüber hinaus kommen bei den Partnern neben SoFi je nach Fragestellung noch weitere Analysewerkzeuge (z.B. MS Office zum Einsatz).

Die nachfolgenden Tabellen geben einen Überblick über die an die Verkehrsbetriebe und Bushersteller versendeten Fragebögen.

**Tabelle 6: Übersicht Datenerfassungsbögen für Verkehrsbetriebe und Bushersteller**

### Verkehrsbetriebe:

Nr.	Inhalt	relevant für AP	Erfassungsart	Wann	für Diesel (D) / Hybrid (H)
1	Grunddaten Hybridbusse	alle	einmalig	Feb 14	H
	Grunddaten Referenzbusse	1.1	einmalig		D
	Datenerfassung - Systembedingte Zusatzkosten	1.2	einmalig		H
	Anfrage bei den VU zu Streckenauswahl, Fahrer-Schulungskonzept	2.6 & 3	einmalig		H u. D
2	SoFi Erfassungsbogen Hybrid	1.1, 2, 5	kontinuierlich	ab Mrz. 14	H
	SoFi Erfassungsbogen Diesel	1.1, 2, 5	kontinuierlich	ab Mrz. 14	D
3	Fragebogen Inbetriebnahme	2.3	einmalig	ab Mrz. 14	H
	Fragebogen Fahrerbefragung	2.6	einmalig		H
4	Fragebogen rein elektrisches Fahren (Betreiber)	2.4	einmalig	Jan 15	H
5	Fragebogen Ersatzteile Hersteller/ Lieferant	2.3	einmalig	Mrz. 15	H
	Fragebogen Werkstattleiter	2.6	einmalig		H

### Bushersteller:

Nr.	Inhalt	relevant für AP	Erfassungsart	Wann	für Diesel (D) / Hybrid (H)
1	Fragebogen zum Schulungsangebot der Hersteller	2.5	einmalig	Feb. 14	H
2	Fragebogen zu fahrzeugspezifischen Möglichkeiten für rein elektrischen Betrieb	2.4	einmalig	Feb. 14	H
3	Ersatzteile	2.3	einmalig	Mrz. 15	H

## **Datenqualität**

Zur Sicherstellung der Datenqualität erfolgt eine individuelle Prüfung der Daten auf Konsistenz und Plausibilität (z.B. Abgleich der Angaben zu Laufleistung und Betriebstunden). Ergeben sich Fragen oder Unklarheiten zu den gelieferten Daten, so erfolgt die direkte Rücksprache beim jeweiligen Verkehrsbetrieb bzw. Bushersteller.

## 5 Bewertung Inbetriebnahme und Linienbetrieb der Hybridbus-Kleinflotten (AP 2)

Wie eingangs erwähnt, werden zunächst die Daten und Ergebnisse der Inbetriebnahme und des Linienbetriebs vorgestellt. Darauf aufbauend werden in Kapitel 6 die Kosten im Linienbetrieb (AP 1) ermittelt.

### 5.1 Zielsetzung und Vorgehensweise

Ziel dieses Arbeitspaketes ist eine betreiberübergreifende Bewertung des Einsatzes von alternativen Busantriebskonzepten im Linienbetrieb. Die Erfahrungen aus dem Linienbetrieb werden mit Hilfe des in Abbildung 10 dargestellten Kriterienkataloges bewertet und dienen als Grundlage für Optimierungsvorschläge und mögliche Lösungsansätze für den effizienten Einsatz der Fahrzeuge. Dieses AP wird gemeinsam von thinkstep und VCDB bearbeitet.

Die Frage nach der technischen Verfügbarkeit der Hybridbusse ist essentiell für den Erfolg der Technologie. Sie wird von Betreibern meist direkt nach den zu erwartenden Systemkosten gestellt. Daher erfolgt die Messung der technischen Zuverlässigkeit in einem hohen Detaillierungsgrad: Die beteiligten Verkehrsunternehmen sollen hierzu nach einem einheitlichen Raster täglich den Kraftstoffverbrauch und die Laufleistung der eingesetzten Dieselhybridbusse als auch der dieselbetriebenen Vergleichsfahrzeuge (vorgesehen ist mindestens 1 je Verkehrsunternehmen) erfassen. Darüber hinaus werden Störungen und Ausfälle der Fahrzeuge oder einzelner Aggregate erfasst. Diese Daten erlauben Aussagen zur Stabilität einzelner Komponenten und damit der Busse insgesamt und geben damit Aufschluss über die Praxistauglichkeit und Einsatzreife der Technologie.

Methodisch wurde auf die im Rahmen der „AG Innovative Antriebe Bus“ angewendete Langzeitdatenerfassung [AG Bus, 2013] aufgesetzt, um eine vergleichbare Datenbasis hinsichtlich der Kraftstoffeinsparpotenziale im Langzeitbetrieb sowie der Zuverlässigkeit der einzelnen Konzepte auf übergeordneter Ebene zu ermöglichen. Dieses Vorgehen stellt auch eine inhaltliche Fortführung der Arbeiten aus dem vorangegangenen Prüfprogramm dar.

### 5.2 Ergebnisse Inbetriebnahme und Linienbetrieb

Die folgende Tabelle zeigt eine Zusammenfassung der Fahrzeuge, für die im Projektzeitraum Betriebsdaten erfasst wurden.

Neben dem Fahrzeugtyp wird hier auch die Abgasnorm angegeben, um kenntlich zu machen, falls ein Referenzfahrzeug im Vergleich zu den untersuchten Hybridbussen eine abweichende Abgasnorm erfüllt. Dies schränkt die unmittelbare Vergleichbarkeit etwas ein, wobei Euro V- und EEV-Busse als weitestgehend vergleichbar anzusehen sind. Grundsätzlich wurde darauf geachtet, vergleichbare Referenzfahrzeuge in die Analyse zu integrieren. Dies ist bei den Verkehrsbetrieben weitestgehend gelungen. So werden bei der Hamburger Hochbahn für die 5 Volvo Solo- und 15 Gelenkhybridbusse, die seit Januar 2015 in der Datenerfassung sind und alle die Euro VI Norm erfüllen, ebenfalls Euro VI Dieselreferenzfahrzeuge betrachtet. Im Fall der WVG in Wolfsburg erfüllt das Diesel-Referenzfahrzeug bereits die Euro VI Norm, während die Hybridbusse EEV Fahrzeuge sind. Seit Januar werden bei Jasper außerdem die Betriebsdaten von 7 weiteren Hybridbussen erfasst, die ebenfalls schon die Euro VI Norm erfüllen, die Referenzfahrzeuge erfüllen hier die Euro V Norm.

Tabelle 7: Übersicht der eingesetzten Hybrid--und Referenzdieselbusse

Verkehrsbetrieb	Anzahl Fzg.	Hersteller	Typ	Art	Referenzfahrzeug	Abgasnorm	Zeitraum Datenerfassung	linienrein
HHA	5 (12*) 15	Volvo	7900 H	Solo Gelenk	--	Euro VI	01/15 – 09/15	-- 109
	1 1	EvoBus	Citaro Citaro	Solo Gelenk	X X	Euro VI Euro VI	01/15 – 09/15	-- 109
Jasper	7 (3**) 10 7*	Volvo	7700 H 7900 H 7900 H	Solo	--	Euro V Euro V Euro VI	09/13 – 03/15 09/13 – 09/15 01/15 – 08/15	--
	7	EvoBus	Citaro	Solo	X	Euro V	09/13 – 09/15	--
SBG	5 (2**) 5	Volvo	7700 H 7900 H	Solo	--	Euro V	09/13 – 09/15	--
	2	EvoBus	Citaro	Solo	X	Euro V	09/13 – 09/15	--
VHH***	10	Volvo	7900 H	Solo	--	EEV	03/14 – 09/15	--
	1	EvoBus	Citaro 530	Solo	X	Euro V	03/14 – 03/15	--
WVG	3	MAN	Lions City Hybrid	Solo	--	EEV	08/14 – 09/15	
	1	MAN		Solo	X	Euro VI	08/14 – 09/15	
üstra	2 4	Solaris	Urbino H12 Urbino H18	Solo Gelenk	--	EEV	04/14 – 09/15	Netz + 470 1 Fzg 121
	2 3	Solaris MAN	Urbino 12 A23	Solo Gelenk	X X	EEV	04/14 – 09/15	-- 1 Fzg. 121
SBI	3	MAN	Lion's City Hybrid	Solo	--	EEV	03/14 – 09/15	Netz + 10/11/X 11
	1	MAN	A21 Lion's City	Solo	X	EEV	03/14 – 09/15	Netz + 10/11/X 11

\* Im September 2015 sind 7 Euro VI Fahrzeuge von Jasper in den Bestand der HHA übergegangen. Aus Gründen der Stringenz in den Auswertungen wurden die Fahrzeuge bei der Betrachtung der technischen Zuverlässigkeit noch beim Unternehmen Jasper mit geführt.

\*\* 3 Fahrzeuge bei SBG und 4 Fahrzeuge bei Jasper planmäßig im März bzw. April 2015 abgemeldet (Ende Mietvertrag, diese Fahrzeuge wurden nicht gefördert, wurden aber zur Verbreiterung der Datenbasis im Rahmen der Langzeitdatenerfassung mit berücksichtigt)

\*\*\* Kraftstoffverbrauchsdaten für Hybridbusse bis 09/15, für Dieselreferenz nur bis 03/15, daher Auswertung Kraftstoffeinsparung auf Basis Daten 04/14-03/15

Die rechte Spalte in der Tabelle gibt schließlich wieder, ob die Fahrzeuge überwiegend im linienreinen Einsatz waren. Dies ist für eine direkte Vergleichbarkeit, gerade der Verbrauchsdaten von zentraler Bedeutung.



VI Fahrzeuge an ihre Muttergesellschaft die Hamburger Hochbahn ab, daher werden die Betriebsdaten dieser Fahrzeuge für September 2015 bei der Hochbahn aufgeführt.

Für 6 Solobusse mit seriellem Hybridantrieb (MAN), die bei der SBI in Ingolstadt und WVG in Wolfsburg eingesetzt werden, sind Daten für 19 bzw. 14 Monate verfügbar, analog für jeweils 1 Dieselreferenzfahrzeug. Die Fahrzeuge in Wolfsburg wurden entsprechend später geliefert.

Für die 2 Solo-Parallel-Hybride sowie 4 Gelenkbusse mit leistungsverzweigten Hybridantrieb von Solaris hat die Datenerfassung bei der üstra Daten einschließlich der 2 Solo- und 3 Gelenkdieselbusse als Referenz im April 2014 begonnen.

### **5.2.1 Technische Zuverlässigkeit der Dieselhybridbusse (thinkstep/VCDB)**

Die Praxistauglichkeit und Einsatzreife der Hybridtechnologie wird im Wesentlichen durch die tägliche Laufleistung und Betriebsstunden bestimmt, wobei die Verfügbarkeit der Fahrzeuge naturgemäß ein wesentliches Kriterium für die Verkehrsbetriebe darstellt. Daher werden auch Ausfallzeiten aufgrund von antriebspezifischen Defekten sowie deren Behebung detailliert erfasst. In diesem Zusammenhang wird ebenfalls der in Anspruch genommene Herstellersupport dokumentiert.

#### *Laufleistung und Betriebsstunden Hybridbusse*

Entsprechend der zum Zeitpunkt der Berichtslegung verfügbaren Daten ergeben sich für die Betreiber die in Tabelle 9 dargestellten Laufleistungen und Betriebsstunden für die eingesetzten Hybridbusse. Es ist zu beachten, dass die Daten nicht direkt miteinander vergleichbar sind, da die Laufleistung und Betriebsstunden zum einen von der Anzahl der eingesetzten Fahrzeuge und zum anderen von der jeweiligen Einsatzplanung und dem örtlichen Streckennetz der Betreiber abhängig sind und der Zeitraum der Datenerfassung teilweise verkürzt ist. So sind für die 20 Parallelhybridbusse der Hamburger Hochbahn Daten für 9 Monate verfügbar.

Die Hamburger Hochbahn AG in Hamburg und die üstra in Hannover betreiben sowohl Solo-Hybridbusse als auch Gelenkhybridbusse.

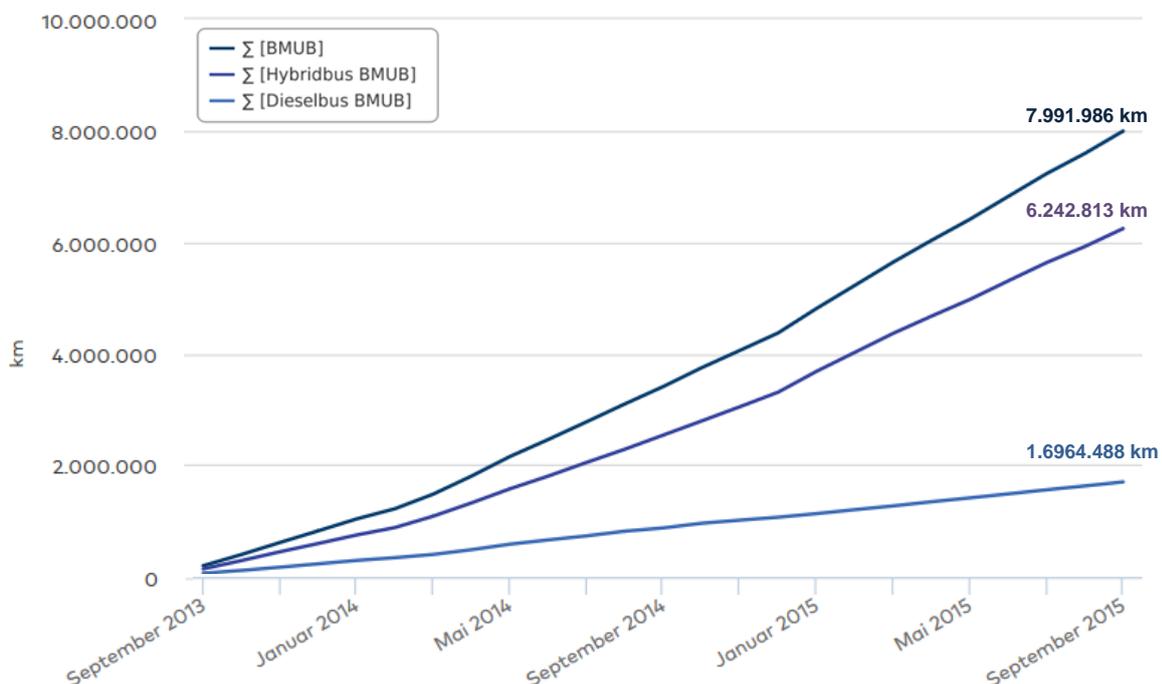
**Tabelle 9: Laufleistung der Hybridbusse je Projekt (Stand September 2015)**

Betreiber (Anzahl Hybrid Fzg.)		Laufleistung [km]			Betriebsdauer [h]		
		gesamt	Ø Fahrzeug	Ø Fzg./ Monat	gesamt	Ø Fahrzeug	Ø Fzg./ Monat
Hochbahn	Solo 5 (12*)	223.785	38.145***	4.521	21.096	3.651	395
	Gelenk 15	522.123	34.808	4.336	54.728	3.649	405
Jasper 24 (10**)		1.925.665	111.698	4.485	183.975	10.671	428
SBG 10 (7**)		1.538.342	165.770	6.634	101.808	10.181	499
VHH (10)		906.949	90.695	4.822	37.604	3.760	294
WVG (3)		254.012	84.671	6.048	12.442	4.147	296
SBI (3)		247.507	82.502	4.342	16.615	5.538	291
Üstra	Solo (2)	252.194	126.097	7.005	13.978	6.989	388
	Gelenk (4)	372.236	93.059	5.233	23.873	5.968	336
<b>Gesamt</b>		<b>6.242.813 km</b>	<b>Ø 91.938 km</b>	<b>Ø 5.270 km</b>	<b>466.119 h</b>	<b>Ø 6.062 h</b>	<b>Ø 370 h</b>

\* seit September 2015 Wechsel von 7 Bussen von Jasper zur Hochbahn, hier aus Gründen der Stringenz weiterhin bei Jasper,

\*\* Mietverträge für 7 bzw. 3 Busse bei Jasper bzw. SBG bei Jasper m März 2015 planmäßig ausgelaufen

Insgesamt wurde von den erfassten Hybridbussen über alle Projekte seit September 2013 bzw. seit Beginn des jeweiligen Linienbetriebs bis einschließlich September 2015 im Rahmen von über 466.000 Betriebsstunden eine Fahrleistung von 6,24 Mio.km erbracht. Abbildung 14 zeigt die Entwicklung der erfassten Laufleistungsdaten. Zu beachten ist das für den Zeitraum September 2013 bis Februar 2014 die Daten von den 27 Bussen bei Jasper und SBG stammen und ab März 2014 sukzessive Daten der anderen Verkehrsbetriebe dazukommen. Die Busse der Hamburger Hochbahn zusammen mit den 7 zusätzlichen Bussen von Jasper sind seit Januar 2015 Teil der Datenbasis.



**Abbildung 14: Erfasste Laufleistung Hybrid- und Dieselbusse BMUB Prüfprogramm**

Die Entwicklung der durchschnittlichen monatlichen Laufleistung pro Hybridbus je Verkehrsbetrieb (4. Spalte von links in Tabelle 9) wird in Abbildung 15 dargestellt.



**Abbildung 15: Durchschnittliche monatliche Laufleistung pro Bus je Verkehrsunternehmen**

Es zeigt sich, dass bei den meisten Verkehrsunternehmen eine weitestgehend stabile durchschnittliche Laufleistung mit den Hybridbussen erzielt werden konnte. Die Anlaufphasen sind dabei im Wesentlichen recht kurz wie z.B. bei den Solobussen der üstra. Bei der WVG ergaben sich aufgrund von Ausfällen einzelner Fahrzeuge bei einer Fahrzeuganzahl von 3 Bussen entsprechende Schwankungen in der durchschnittlichen monatlichen Laufleistung. In Ingolstadt ist mit dem Fahrplanwechsel zum Ende des Jahres 2014 ein Anstieg der monatlichen Laufleistung zu beobachten.

#### *Verfügbarkeit und Zuverlässigkeit der Hybridbusse*

Die Erfassung der technischen Verfügbarkeit erfolgt kontinuierlich betriebsbegleitend über die SoFi-Datenerfassung. Hierbei werden folgende Parameter abgefragt:

- Plan-Betriebsstunden
- Ist-Betriebsstunden
- kein Betrieb Defekt Hybridantriebsstrang
- kein Betrieb Defekt HLK (Heizung/Lüftung/Klimatisierung)
- kein Betrieb Defekt Abgassystem
- kein Betrieb sonstiger Defekt
- kein Betrieb Unfall / Vandalismus
- kein Betrieb Wartung

Aus diesen Werten lässt sich die fahrzeugbezogene Verfügbarkeit und die Zuverlässigkeit ableiten, wobei Betriebsausfälle aufgrund von Unfällen, Vandalismusedelikten generell nicht berücksichtigt werden, da diese technologieunabhängig auftreten und sich auch hinsichtlich der Schadensbehebung in der Regel nicht signifikant unterscheiden.

Grundlegend untersucht wurde der Unterschied zwischen Verfügbarkeit und Zuverlässigkeit, um je einen Wert zu erzeugen, der auch geplante Wartungsarbeiten einbezieht und einen Wert, der ausschließlich defektbedingte Standzeiten berücksichtigt. Hintergrund war die Überlegung, dass Hybridbusse abweichende Wartungsintervalle und –zeiten aufweisen könnten

als Dieselbusse, was aus Sicht der Verkehrsunternehmen in die Gesamtbewertung der Technologie einfließen müsste.

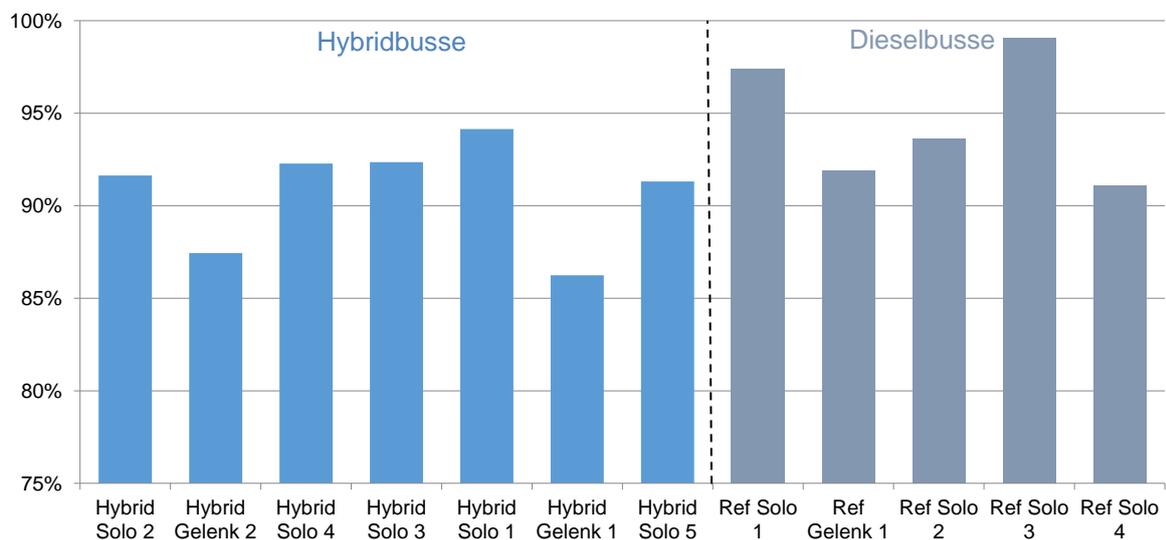
Das Grundprinzip bei der Berechnung lautete also für die beiden Verfügbarkeitsparameter:

- Verfügbarkeit = IST-Betriebsstunden / PLAN-Betriebsstunden
- Zuverlässigkeit = IST-Betriebsstunden + Wartungszeiten / PLAN-Betriebsstunden

Die Differenzen zu den entsprechenden Zuverlässigkeitswerten lagen bei der Überprüfung im Rahmen des zweiten Zwischenberichtes im Durchschnitt bei ca. 1 %. Demnach sind im Betrachtungszeitraum die wartungsbedingten Standzeiten im Vergleich zu den Defekten vernachlässigbar. Von einer differenzierten Betrachtung der beiden Parameter wurde daher im Folgenden abgesehen.

Die allgemeine Fahrzeugverfügbarkeit wird unter Einbeziehung aller übrigen Ausfallgründe berechnet, um die Gesamtreife der Busse zu beurteilen. Hierzu reicht es nicht aus, nur hybridbedingte Ausfälle zu berücksichtigen, da die Erfahrungen der Vergangenheit gezeigt haben, dass auch Ausfälle jenseits des Antriebsstrangs „exklusiv“ bei Hybridbussen aufgetreten sind, weil bestimmte Komponenten andere Technologien oder Dimensionierungen hatten als bei konventionellen Dieselbussen (z. B. Heizung/Lüftung/Klimatisierung).

Alle betrachteten Fahrzeugtypen konnten im Beobachtungszeitraum hohe bis sehr hohe Verfügbarkeitswerte erreichen. Die Verfügbarkeit der Hybridbusse lag durchweg um 90 % und damit nur durchschnittlich 3 % unter den Werten der Diesel-Referenzfahrzeuge. Ausnahmen waren der Hybrid Gelenk 1 und 2 (mit 86% bzw. 87 %). Der Hybrid Solo 1 konnte bei der Verfügbarkeit den Bestwert von 94,1 % erzielen (vgl. Abbildung 16).



**Abbildung 16: Mittlere Verfügbarkeit der Hybridbusse und Diesel-Referenzfahrzeuge**

Analog zur fahrzeugtypbezogenen Verfügbarkeit weisen die Verkehrsbetriebe ebenfalls gute (88%) bis sehr gut (96%) Verfügbarkeitswerte auf (siehe Abbildung 17).

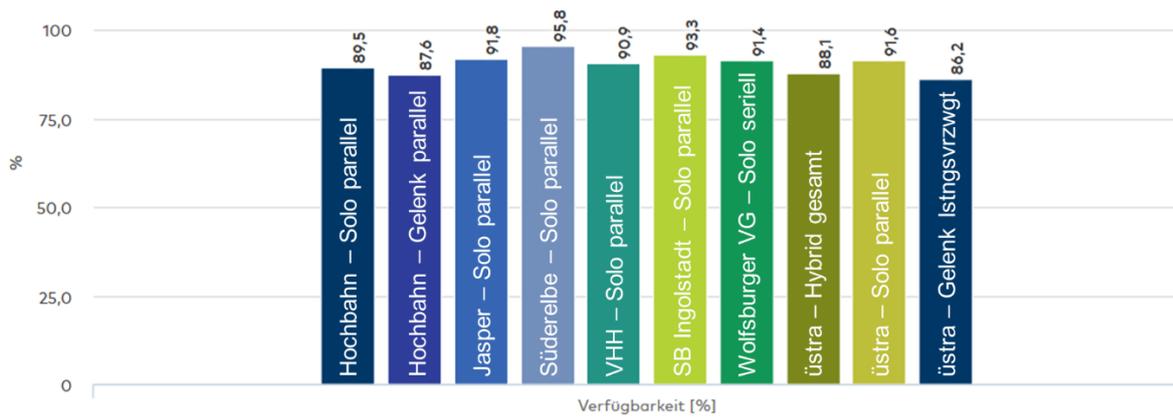


Abbildung 17: Durchschnittliche Verfügbarkeit der Hybridbusse je Verkehrsunternehmen

Verfügbarkeit im zeitlichen Verlauf

Bei der betreiberbezogenen Betrachtung der Verfügbarkeit und Zuverlässigkeit ergibt sich ein recht homogenes Bild. Die durchschnittliche Verfügbarkeitsquote über den Betrachtungszeitraum liegt zwischen 88 und knapp 96 % (vgl. Abbildung 18). Fast jedes Unternehmen hat im Betrachtungszeitraum einen „schwarzen“ Monat erwischt, in dem wegen mehrerer gleichzeitiger Standzeiten über mehrere Tage oder wegen des Komplettausfalls eines Fahrzeugs die Verfügbarkeitsquote etwas einbricht (z. B. Oktober 2014 bei SBI und üstra). Dies ist jedoch keine Erscheinung, welche die Hybridbusse exklusiv für sich beanspruchen, sondern findet sich in Einzelfällen auch bei den Diesel-Referenzfahrzeugen wieder.

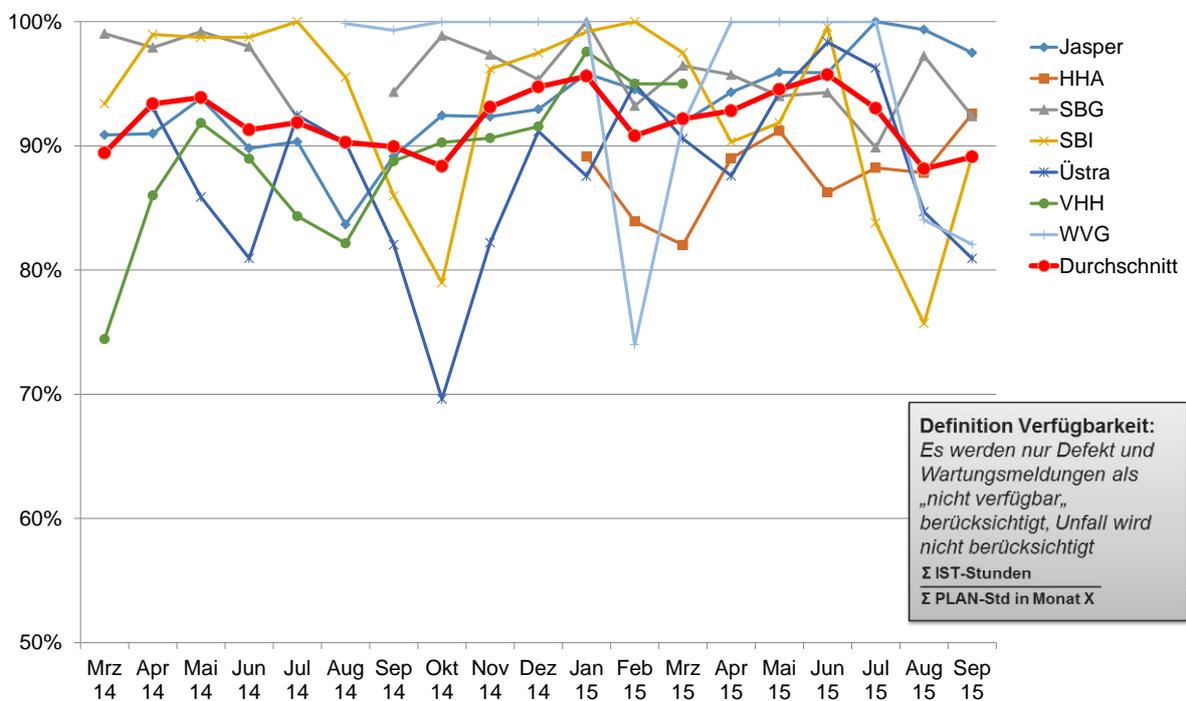


Abbildung 18: Verfügbarkeit der Hybridbusse nach beteiligten Verkehrsunternehmen im Betrachtungszeitraum

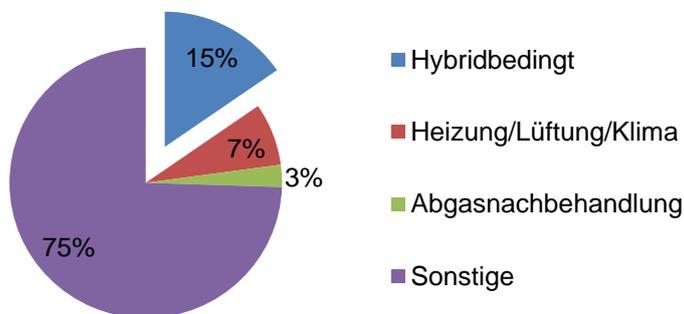
Eine klassische „Einlaufkurve“ lässt sich aus den vorhandenen Daten nicht ableiten. Zum einen wurden nicht alle Fahrzeuge von Beginn der Betriebsaufnahme an erfasst, zum anderen

gibt es Unternehmen, die in den Anfangsmonaten eine etwas niedrigere Verfügbarkeit verzeichneten (z. B. VHH, HHA), gleichzeitig konnten andere Betreiber von Beginn an mit einer Verfügbarkeit der Hybridbusse von annähernd 100 % profitieren (z. B. SBG, WVG), hatten aber mitunter nach einigen Monaten Probleme.

Einschränkend muss angemerkt werden, dass bedingt durch den teilweise späteren Start der begleitenden Messungen nicht alle Fahrzeuge von Beginn an in die Erfassung aufgenommen werden konnten. So ist ein Fall bekannt, bei dem die gesamte Hybridbusflotte während der ersten drei Monate nach Inbetriebnahme mehrfach und zum Teil gleichzeitig in der Vertragswerkstatt stand, danach aber Verfügbarkeiten von über 90 % aufwies.

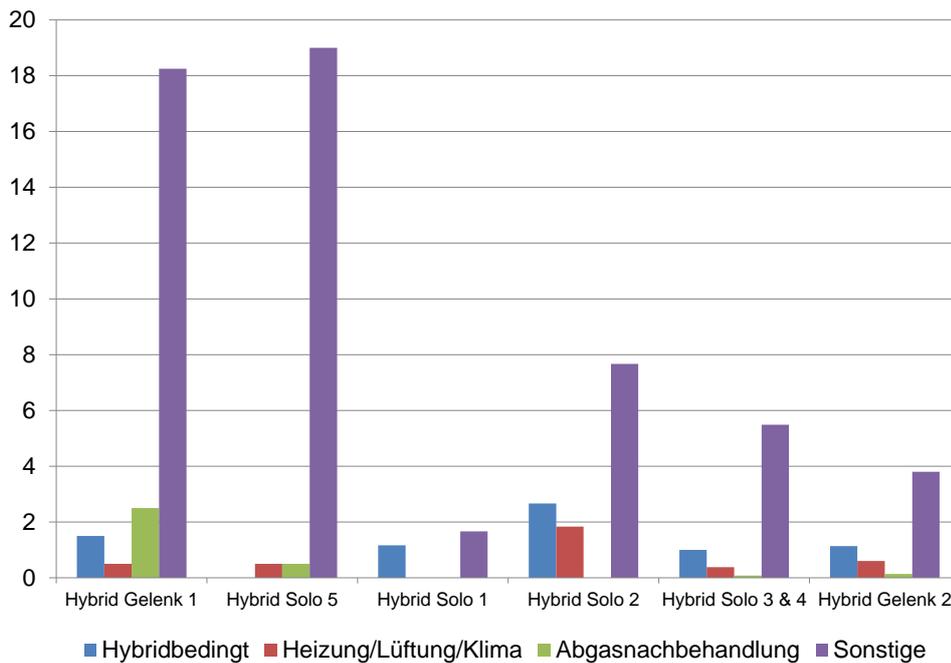
### Ausfallursachen

Die Verteilung der Ausfallursachen schwankt von Fahrzeugtyp zu Fahrzeugtyp. Selbst verschiedene Fahrzeugtypen des gleichen Herstellers weisen hier Differenzen auf, wobei die erkennbare Abnahme hybridbedingter Ausfallereignisse pro Fahrzeug vom älteren zum neueren Modell durchaus geeignet ist, die zunehmende Reife der Technologie zu dokumentieren. Insgesamt, also fahrzeugtypübergreifend liegen hybridssystembedingte Ausfälle bei 15 % aller Defektereignisse. 7 % der Defekte sind dem Bereich Heizung/Lüftung/Klima zuzuordnen. Die verbleibenden 75 % verteilen sich auf die verschiedensten Ausfallursachen, die unter der Kategorie „Sonstige“ zusammengefasst wurden (vgl. Abbildung 19). Eine dezidiertere Analyse auf Basis der von den Betreibern gelieferten Präzisierungen im Kommentarfeld folgt weiter unten.



**Abbildung 19: Ausfallgründe nach Hauptkategorien**

Es zeigt sich, dass hybridbedingte Ausfälle insgesamt vergleichsweise selten die Ursache für Ausfälle sind. Eine Ausnahme stellt der Hybrid Solo 1 dar, wo 41 % der Ausfallereignisse hybridbedingt waren. Dies ist aber vor dem Hintergrund der insgesamt sehr niedrigen Fallzahlen zu sehen. Eine nach Fahrzeugtypen gegliederte Aufteilung der Ausfallgründe ist in Anhang B sowohl anteilmäßig als auch nach Ausfallstunden wiedergegeben.



**Abbildung 20: Ausfallgründe - Ereignisse je Fahrzeug nach Hersteller/Typ**

Die Betrachtung der Ausfallereignisse zeigt sich beim Hybrid Solo 2 eine gewisse Erhöhung der hybridbedingten Ausfälle sowie der Heizung/Lüftung/Klima basierten Ausfällen(vgl. Abbildung 20).

Auffällig sind die hohen Fallzahlen in der Kategorie „Sonstige“ im Fall des Hybrid Gelenk 1 und des Hybrid Solo 5, wobei angemerkt werden muss, dass unter „Sonstige“ sämtliche Fehlerursachen subsummiert sind, die nicht unter die drei anderen Kategorien fallen, vom Defekt des Verbrennungsmotors bis zum Fahrscheindrucker. Eine Sensitivitätsanalyse der am häufigsten benannten Ausfallgründe ergibt kein wirklich schlüssiges Bild, am ehesten fällt auf, dass viele häufig genannte Ursachen wohl kleinere Defekte darstellen, die innerhalb eines Tages (oder darunter) behoben werden können. Möglicherweise wurden solche „Bagatelldefekte“ bei anderen Betreibern nicht konsequent erfasst.

**Tabelle 10: Sensitivitätsbetrachtung Ausfallursachen**

<b>Ausfallgrund</b>	<i>Anzahl Ereignisse</i>	<i>Ausfalltage gesamt</i>	<i>Ausfalltage/Ereignis</i>
Fahrersitz	14	14	1
Getriebe	14	66	4,7
ISM-Signal	9	19	2,1
Funk/LSA	16	16	1
Rampe	13	13	1

Die Ausdifferenzierung der Hauptausfallgründe nach bestimmten Defektgruppen ergibt folgendes Bild:

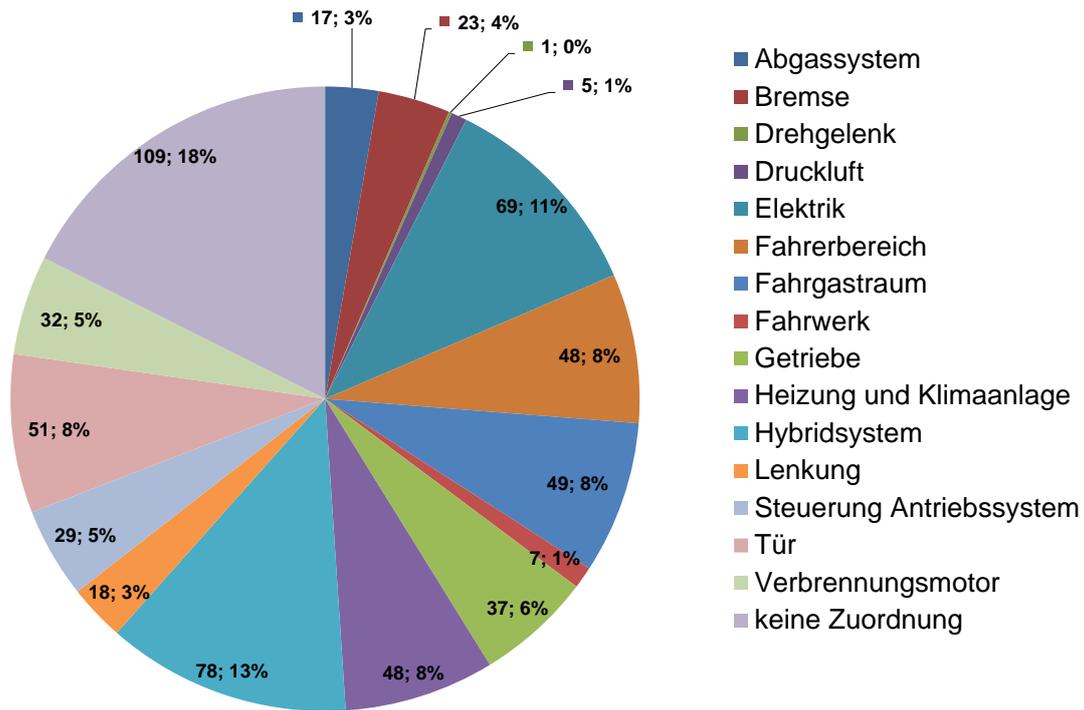


Abbildung 21: Ausfallereignisse nach Defektarten

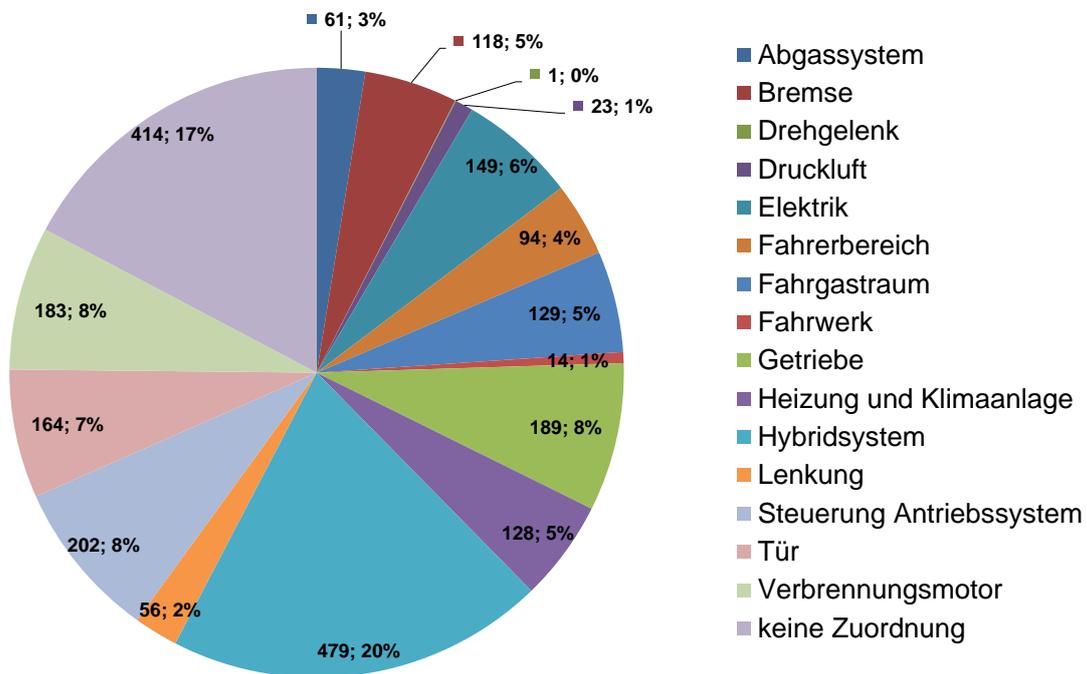


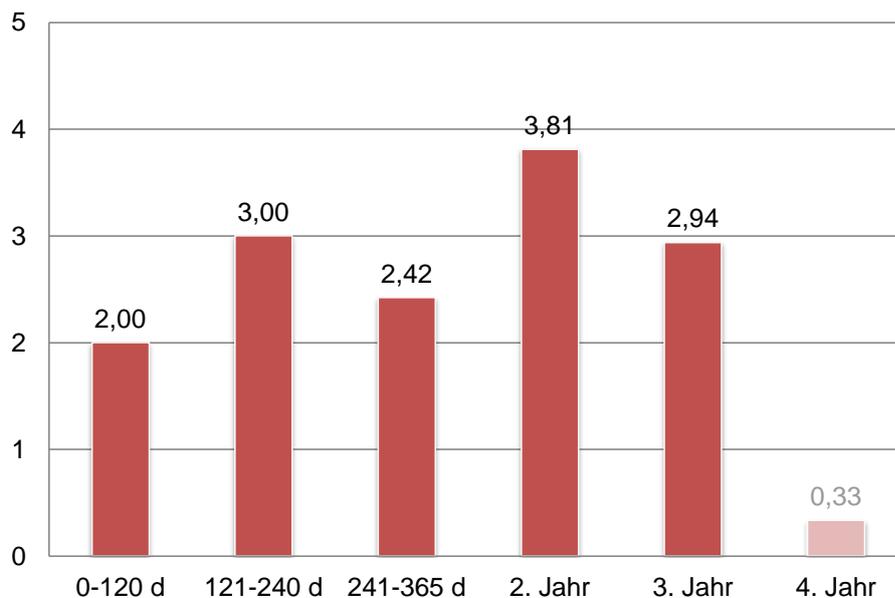
Abbildung 22: Ausfalltage nach Defektarten

Hier fällt insbesondere auf, dass die Defektarten, die dem Antriebsstrang zuzuordnen sind, also die Schäden am Hybridsystem, dem Verbrennungsmotor, dem Getriebe und der Steuerung des Antriebssystems zu etwas längeren Ausfallzeiten (durchschnittlich 6 Ausfalltage je Ausfallereignis für die vier genannten Kategorien gegenüber durchschnittlich 3,9 Ausfalltagen

je Ereignis in allen Kategorien) geführt haben, als dies der Anteil an Schadensereignissen nahelegen würde.

In der Detailbetrachtung zeigt sich, dass diese Defekte in aller Regel nicht auftreten, weil Komponenten aus dem Bereich der Elektrotraktion im engeren Sinne (Elektromotoren, Traktionsenergiespeicher) ausgefallen sind. Meistens gibt es Probleme beim Zusammenspiel zwischen dem Diesel- und dem Elektro-Antriebsstrang (z. B. in den Steuerungssystemen), häufig treten aber auch Mängel auf, die ausschließlich den Dieselkomponenten zuzuordnen sind (z. B. Motorlager, Ölaustritt, Motorkühlung). Eher vereinzelt wurden Defekte an der Generatoreinheit (APU) angezeigt.

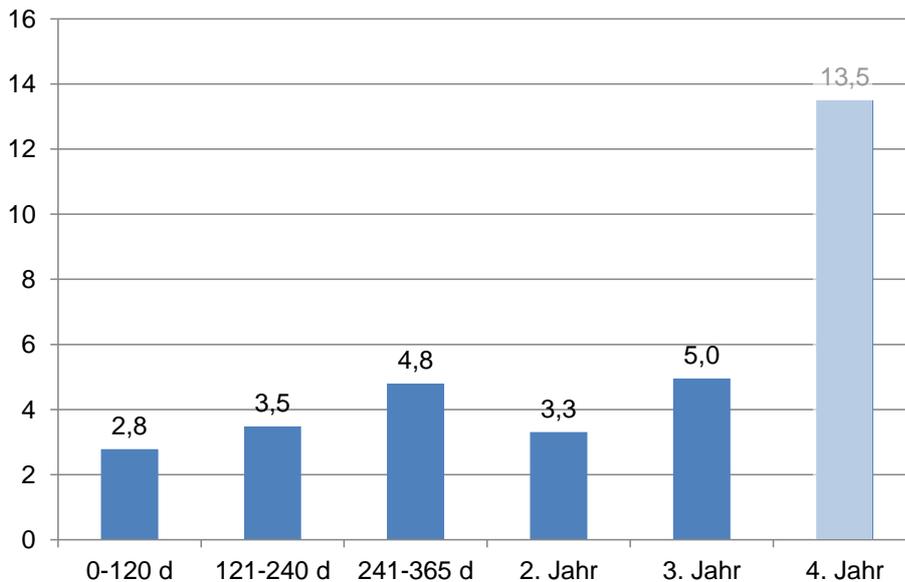
Untersucht wurde auch der Zeitpunkt des Auftretens von Defekt ereignissen. Entsprechend Abbildung 23 zeigt sich, dass bei den erfassten Fahrzeugen keine signifikante Häufung von Schadensereignissen in einem bestimmten Abschnitt des Betrachtungszeitraums zu beobachten ist. In den ersten Betriebsquartalen hatte ein Fahrzeug im Durchschnitt je zwei bis drei defektbedingte Ausfallereignisse. Im gesamten zweiten Betriebsjahr beläuft sich dieser Wert auf 3,8, um im gesamten dritten Betriebsjahr auf drei zu sinken. Die Resultate für das vierte Betriebsjahr sind aufgrund der geringen Stichprobe aktuell nicht aussagekräftig.



**Abbildung 23: Verteilung von Schadensereignissen pro Fahrzeug nach Betriebsdauer**

Bei der durchschnittlichen Ausfallzeit pro Defekt ereignis ist interessant zu sehen, dass etwas längere Standzeiten eher im letzten Drittel des ersten Betriebsjahres zu verzeichnen sind (siehe Abbildung 24). Generell liegt die durchschnittliche Ausfallzeit bei drei bis vier Tagen je Schadensereignis. Die Bandbreite ist jedoch sehr hoch und reicht von Ausfällen, die durch mobile Services während des laufenden Betriebs behoben werden konnten bis hin zu mehrwöchigen Ausfällen, bei denen das Fahrzeug teilweise sogar zurück in das Herstellerwerk transferiert werden musste. Bei den Fahrzeugen, die schon seit längerem erfasst werden, zeigt sich im vierten Betriebsjahr ein Anstieg der durchschnittlichen Ausfallzeit auf über 13,5 Tage. Hier dürfte sich auswirken, dass die Betreiber vor Ablauf von Gewährleistungsfristen verstärkt auf die Behebung von Defekten drängen, die eine Fahrzeugstilllegung nicht zwingend erfordern

würden, aber noch über die Herstellergewähr beseitigt werden sollen. Bei den meisten Betreibern liegt der vereinbarte Gewährleistungszeitraum bei drei bis vier Jahren, wobei teilweise für den Hybridteil eine verlängerte Gewährleistung eingeräumt wurde (vier bis fünf Jahre). Dies ist allerdings auch hier wieder vor dem Hintergrund der geringen Stichprobe für das 4. Jahr zu sehen, insofern handelt es sich hier um einen ersten, aktuell noch nicht weiter verallgemeinerbaren, Erklärungsansatz.



**Abbildung 24: Durchschnittliche Ausfallzeit pro Defektereignis nach Betriebsdauer**

In der Einzelfallbetrachtung sind folgende Defekte durch eine besondere Häufung oder überdurchschnittliche Ausfalldauer aufgefallen:

**Tabelle 11: Auffällige Defektereignisse in der Datenerfassung**

<i>Hersteller</i>	<i>Defekt</i>	<i>Betroffene Fahrzeuge</i>	<i>Standzeit gesamt</i>
Hersteller 1	Summiergetriebe	2	18 Tage
Hersteller 2	Getriebeprobleme	17	112 Tage
	24 V-Batterie	8	94 Tage
	Umbau Motorlagerung	5	80 Tage
	Wassereinbruch Karosserie	3	11 Tage
Hersteller 3	Bremsanlage	3	79 Tage
	Getriebeprobleme	4	77 Tage
	Abgassystem (v. a. Sensoren)	4	42 Tage*

\* schwerpunktmäßig aufgetreten in 2015

Bei den Summiergetriebe-Problemen des Herstellers 1 handelt es sich nur um eine Teilerfassung, da die Problematik bei einem Verkehrsbetrieb in deutlich stärkerem Umfang in den ersten Betriebswochen vor Beginn der Datenaufnahme aufgetreten ist. Bei den erfassten Vorfällen handelt es sich um einen Follow-Up der Probleme aus dem Jahr 2013. Interessanterweise

sind beim zweiten Betreiber des gleichen Fahrzeugtyps keine vergleichbaren Probleme aufgetreten. Allerdings sind diese Hybridbusse etwa ein Jahr später ausgeliefert worden, so dass anzunehmen ist, dass man aufgrund der Erfahrungen entsprechend nachgebessert hat.

Auch bei den Herstellern 2 und 3 führen die Getriebe zu wiederholten und längeren Ausfällen bei einer größeren Anzahl von Fahrzeugen. Insbesondere bei Hersteller 2 ist jedoch die deutlich größere Flotte zu berücksichtigen. Es ist durchaus bemerkenswert, dass es bei den Getrieben des seriellen Hybridantriebs ebenso zu signifikanten Problemen gekommen ist wie bei den parallelen und leistungsverzweigten Hybridantrieben.

Bei Hersteller 3 sind insbesondere in den letzten Betrachtungsmonaten verstärkt Probleme mit der Abgasanlage aufgetreten, wobei es sich in den meisten Fällen um fehlerhafte Sensoren handelte. Die im Jahr 2014 recht dominanten Probleme mit der Bremsanlage scheinen dagegen gelöst worden zu sein. Im gesamten Erfassungszeitraum 2015 musste kein Hybridbus des Herstellers wegen Bremsproblemen den Dienst einstellen.

Hersteller 2 hatte insbesondere in der Anfangszeit erheblich mit Vibrationen im Fahrzeug zu kämpfen, deren Ursache in der Motorlagerung lag. Beim Betreiber VHH führten die Vibrationen sogar zu vereinzelt gesundheitlichen Beschwerden im Fahrdienst (Kopfschmerzen wegen Vibrationen und Geräuschentwicklung). Nach einer Rücküberführung der Fahrzeuge ins Werk konnten die Probleme behoben bzw. auf ein erträgliches Maß reduziert werden. Im Zuge der Werkstattleiterinterviews stellte sich heraus, dass die Problematik wohl insbesondere bei der dreitürigen Variante des Hybrid Solo aufgetreten ist. Hier musste wegen des Einbaus der dritten Tür die Motorlagerung verändert werden.

Ebenfalls bei Hersteller 2 wurden wiederholt Probleme am 24-V-System, bzw. an den 24-V-Batterien festgestellt. Hier spielen verschiedene Aspekte eine Rolle: Zum einen wurde in der Betreiberbefragung geäußert, dass die Starterbatterien wohl im Vergleich zu anderen Fahrzeugen des Betreibers deutlich unterdimensioniert seien (konkreter Vergleich: Hybrid Solo 4 mit 210 Ah gegenüber Dieselfahrzeug von einem anderen Hersteller mit 450 Ah). Zum anderen gibt es wohl verschiedentlich Probleme bei der Aufladung des 24-V-Systems, die in den meisten Fällen gepaart mit Hybridstörungen aufgetreten sind (und deshalb in der Bewertung der Ausfallgründe und Defektarten als hybridbedingte Störung klassifiziert wurden).

Aus Basis der erhobenen Daten und vorbehaltlich der weiteren Entwicklung kann man derzeit von einer Verfügbarkeit der Hybridbusse sprechen, die vergleichbar ist mit derjenigen bei Einführung neuer Fahrzeugtypen im konventionellen Bereich. Dies gilt auch vor dem Hintergrund der zuvor geschilderten Probleme.

Im Gegensatz zur vergangenen Hybridbus-Begleitforschung liefern die erfassten Daten keinen Anhalt dafür, bei der Einführung von Hybridbussen in den Anfangsmonaten eine höhere Fahrzeugreserve vorzuhalten, die sich als systembedingte Mehraufwendungen auswirken würde. Diese Aussage wurde in den abschließenden Betreiberinterviews von den meisten Werkstattleitern bestätigt. Zwar wurde in vier Verkehrsunternehmen für die ersten Betriebsmonate eine erhöhte Fahrzeugreserve eingeplant, in Anspruch nehmen mussten sie in den ersten Wochen jedoch nur zwei Betreiber, konkret empfohlen wurde eine höhere Reserve nur von einem Unternehmen.

Einen zusammenfassenden Überblick zu den einzelnen Fahrzeugen liefern die Typberichte im Anhang C.

### 5.2.2 Technische Zuverlässigkeit Ladeinfrastruktur (thinkstep/VCDB)

In Hamburg werden 3 12 m Plug-In Hybridbusse von Volvo auf der Innovationslinie 109 seit 2015 betrieben. Nach einer etwas länger als ursprünglich geplanten Anlaufphase befinden sich die Busse seit Spätsommer 2015 im Regelbetrieb. Die Verzögerung ergab sich aus verschiedenen, vorwiegend technischen Gründen. So bedurfte es beispielsweise zusätzlicher Abstimmungsarbeiten um eine zuverlässige Kommunikation zwischen Fahrzeug und Ladeinfrastruktur zu gewährleisten.

Die ursprünglich vorgesehene Betrachtung der technischen Zuverlässigkeit der Ladeinfrastruktur muss hier leider entfallen, da auf Basis von 2 Monaten Regelbetrieb noch keine ausreichende Datenbasis vorliegt, um darauf basierend belastbare Aussagen zu Betriebserfahrungen mit diesem Fahrzeugtyp treffen zu können. Diese Untersuchungen bleiben weiterführenden Begleitforschungsvorhaben vorbehalten.

### 5.2.3 Inbetriebnahme / technischer Herstellersupport / Ersatzteile (VCDB)

Hier werden im Wesentlichen die operativen Rahmenbedingungen untersucht, die sich für die Verkehrsunternehmen im Rahmen des Hybridbuseinsatzes ergeben. Auch die After-Sales-Betreuung durch die Fahrzeughersteller bzw. deren Beauftragte oder autorisierte Partner ist Gegenstand der Betrachtung.

#### *Inbetriebnahme*

Es wird untersucht, ob durch die elektrischen Traktionskomponenten im Hochvoltbereich der Zulassungsprozess der Hybridbusse von dem konventioneller Dieselsebusse abweicht.

Zu diesem Zweck wurde ein Fragebogen erarbeitet und an die teilnehmenden Verkehrsunternehmen versandt. Dieser Fragebogen untergliedert sich in die 4 Hauptkategorien

- Zulassung der Fahrzeuge
- Inbetriebnahme
- Aufgetretene/identifizierte Mängel
- Inbetriebnahme der kundenspezifischen Anlagen

Alle Verkehrsunternehmen, deren Hybridbusse bereits ausgeliefert wurden, erhielten den Fragebogen im April 2014, die beiden verbleibenden Verkehrsunternehmen ca. 4 bis 8 Wochen nach der erfolgten Inbetriebnahme.

Eine Übersicht über die Evaluationsergebnisse zeigt, dass sich die Zulassung und Inbetriebnahme in den einzelnen Verkehrsunternehmen im Hinblick auf die Herangehensweise in den Unternehmen und die Anforderungen der Zulassungsstellen recht unterschiedlich darstellt. Größere Probleme sind im Zulassungs- und Inbetriebnahmeprozess nicht aufgetreten.

Die Qualität der Fahrzeuge bei der Inbetriebnahme war recht hoch, in zwei Fällen waren etwas umfassendere Mängel im allgemeinen Fahrzeugteil festzustellen, in einem Fall wurden Leistungsdefizite angezeigt. Bei einem Verkehrsunternehmen besteht eine Stillschweigevereinbarung mit dem Hersteller bezüglich Fahrzeugmängeln, so dass hier keine weiteren Angaben vorliegen.

Im Hybridteil wurden bei zwei Betreibern Mängel während der Abnahme festgestellt: Bei einem Verkehrsunternehmen war eine Softwareanpassung im Bereich der Hochvoltbatterie erforderlich, um auch bei niedrigen Zelltemperaturen die Versorgung der Nebenverbraucher aus der HV-Batterie zu gewährleisten. Bei einem anderen Betreiber wurden Leistungslücken beim Umschalten von Elektro- auf Dieselantrieb erkannt.

Die übrigen Angaben sind sehr heterogen und lassen kaum verallgemeinernde Rückschlüsse zu. So wurden etwa für die Inbetriebnahme pro Fahrzeug Zeitaufwände zwischen vier und sechzehn Stunden ausgewiesen. Nur zwei Unternehmen gaben eine gesonderte Inbetriebnahme für den Hybridantriebsstrang an.

Der Einbau kundenspezifischer Anlagen wie Fahrscheindrucker, Entwerter etc. konnte in allen Fällen ohne Mehraufwand gegenüber konventionellen Bussen erfolgen.

Soweit Angaben über Mängelanzeigen im Zuge der Inbetriebnahme gemacht wurden, handelte es sich in aller Regel um Bagatellen ohne Bezug zur besonderen Fahrzeugtechnologie. Lediglich ein Betreiber bemängelte Defizite bei der Heizleistung im allgemeinen Fahrzeugteil und Leistungslücken beim Umschalten zwischen Diesel- und Elektrobetrieb.

Es bestätigt sich die grundsätzliche Erkenntnis aus der vorherigen Hybridbus-Begleitforschung, dass die Inbetriebnahme eines Hybridbusses weder für Zulassungsstellen noch für die Betreiber eine signifikant höhere Hürde darstellt als die Inbetriebnahme konventioneller Dieselfahrzeuge.

Alle Ergebnisse der Inbetriebnahmebefragung sind in einer Tabelle (Anhang C) zusammengefasst.

#### *Technischer Herstellersupport/Ersatzteile*

Weiterhin erfolgte eine Untersuchung der After-Sales-Services durch die Hersteller. Dies betrifft insbesondere den Herstellersupport und die Versorgung mit Ersatzteilen. Da es sich hierbei um durchgehend betriebsbegleitende Aspekte handelt, wurde die Evaluierung bei den Verkehrsunternehmen in die SoFi-Datenerfassung integriert. Einzelne Aspekte wurden im Rahmen der Betreiberinterviews zum Ende der Begleitforschung noch etwas näher beleuchtet. Von drei Verkehrsunternehmen wurden die Verfügbarkeitsdaten über die betriebsinterne Datenerfassung bereitgestellt, dort wurden entsprechend keine Zufriedenheitswerte über den Herstellersupport erfasst. Im Zuge telefonischer Nachbefragungen zur Werkstatteleiter-Befragung wurde jedoch grundsätzliche Zufriedenheit mit dem Herstellersupport geäußert, bei einem der drei Verkehrsunternehmen jedoch mit Verweis auf die seinerzeit kurze Einsatzdauer. Vom zweiten Betreiber wurde konkret eine zu geringe Flexibilität bei Garantiefällen sowie eine teilweise schleppende Ersatzteilversorgung bemängelt.

Weiterhin konnten beim Betreiber für den Verlängerungszeitraum von April bis September 2015 keine Angaben zum Herstellersupport bereitgestellt werden, so dass für diesen Zeitraum keine Daten für den Support verfügbar sind. Die nachfolgenden Darstellungen zeigen für diesen Betreiber den Stand für den Erhebungszeitraum März 2014 bis einschließlich März 2015.

So sind die Verkehrsunternehmen aufgefordert, bei Inanspruchnahme von Serviceleistungen diese entsprechend fahrzeugbezogen und zeitlich zugeordnet in das System SoFi einzugeben. Folgende Parameter und Antwortvorgaben wurden hierfür definiert:

- Art der in Anspruch genommenen Supportleistungen
  - telefonischer Support/Hotline
  - Webportal
  - Mobiler Service/Monteur
  - Überstellung Vertragswerkstatt
  - Sonstige (bitte Kommentarfeld für weitere Erläuterung nutzen)
- Erreichbarkeit Herstellersupport zufriedenstellend?
  - ja/nein
- Reaktionszeit zufriedenstellend?
  - ja/nein
- Problemlösung erfolgt?
  - ja/nein/teilweise (bitte im Kommentarfeld präzisieren)
- bei Defekt: Behebung durch
  - Selbst
  - Hersteller (mobiler Service / Monteur)
  - Vertragswerkstatt
  - Sonstige (bitte Kommentarfeld für weitere Erläuterung nutzen)
- bei Defekt: Ersatzteilanforderung durch
  - Selbst
  - Hersteller (mobiler Service / Monteur)
  - Vertragswerkstatt
  - Sonstige (bitte Kommentarfeld für weitere Erläuterung nutzen)
- angefordertes Ersatzteil
- Kommentar/Besondere Probleme/bei Wartung bitte Angabe Wartungsart und -intervall

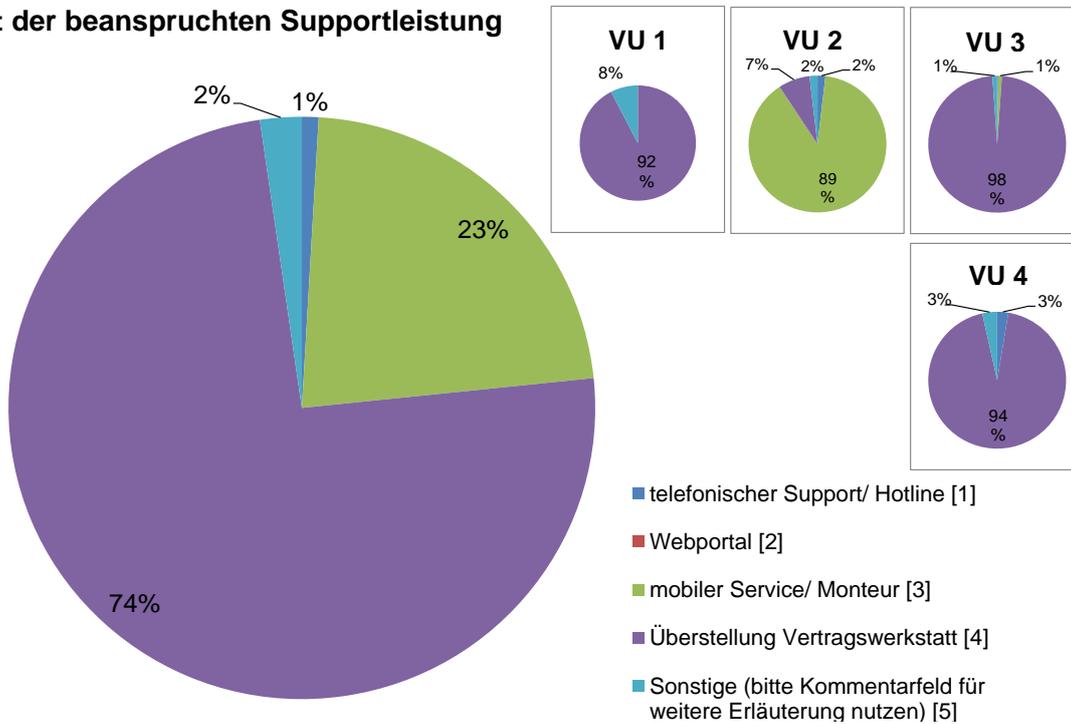
Insgesamt wurden so bisher knapp 900 Supportfälle erfasst. Bezüglich der Art der von den Betreibern in Anspruch genommenen Supportleistungen zeichnet sich ein klarer Trend ab (vgl. Abbildung 25): In 74 % der Fälle wurde die Überstellung an eine Vertragswerkstatt gewählt, in etwa 23 % der Fälle konnte ein mobiler Service oder Monteur des Herstellers beim Verkehrsunternehmen Abhilfe schaffen. In nur 1 % der Fälle wurde eine Hotline eingeschaltet, ein Webportal wurde nicht genutzt. Eine Differenzierung der unter „Sonstige“ verbuchten Supportanfragen wurde nicht vorgenommen, im Rahmen der telefonischen Werkstattleiterbefragung konnte die Angabe „Sonstige“ auch nicht mehr nachvollzogen werden. Es wird aber deutlich, dass die klassischen Unterstützungsleistungen auch bei den Hybridbussen überwiegen.

Bei der betreiberbezogenen Untergliederung (rechts oben in Abbildung 25 dargestellt) ist zu ergänzen, dass die mobilen Supportleistungen beim Kunden vollumfänglich beim verkehrsunternehmen (VU) 2 anfielen, demnach also dem Hersteller 3 zuzuordnen sind. Dies ist dem Umstand geschuldet, dass Hersteller 3 – im Vergleich zu großen Herstellern mit bedeutendem Nutzfahrzeuganteil – nicht über ein flächendeckendes Servicenetz aus Vertragswerkstätten verfügt. Stattdessen setzt der Hersteller auf eine Kombination aus mobilen Servicemonteuren

(den so genannten „Flying Doctors“) und dem Abschluss von Verträgen mit den Instandhaltungsbetrieben größerer Verkehrsunternehmen, die dann als Vertragswerkstätten des Herstellers 3 auch für externe Kunden Busse dieses Herstellers bearbeiten.

Bei den VUs 1, 3 und 4 überwiegen klar die Werkstattüberstellungen. VU 1 und 4 haben jeweils einen Full-Service-Vertrag mit dem Hersteller abgeschlossen.

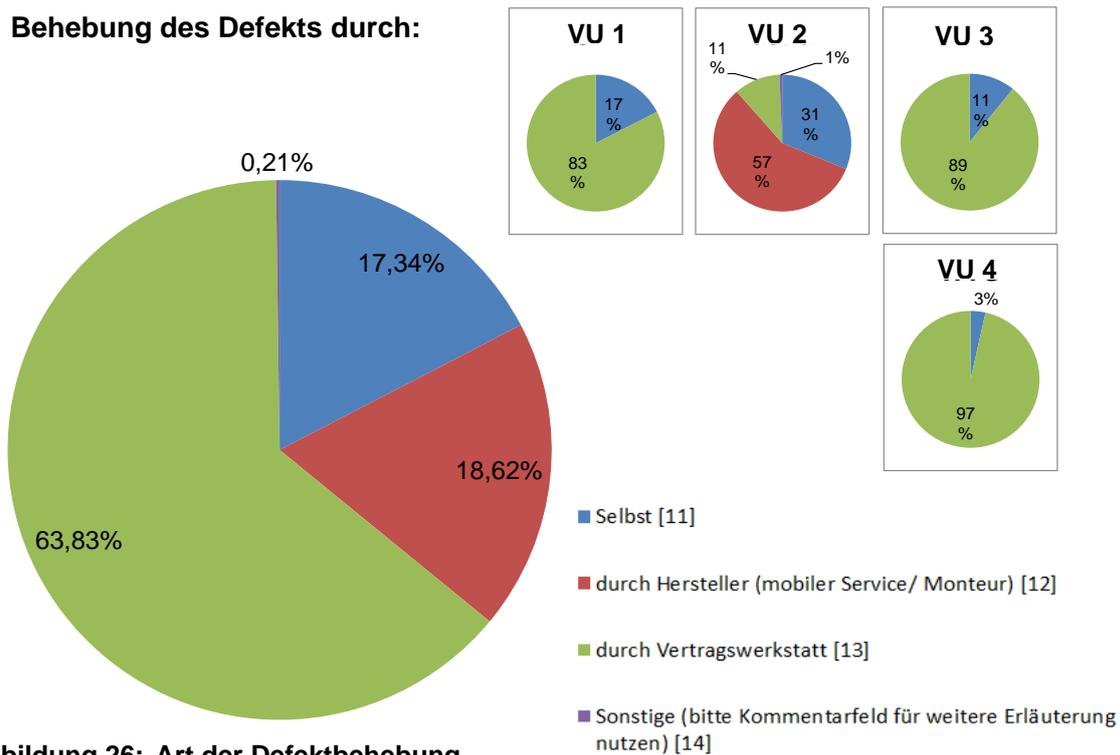
**Art der beanspruchten Supportleistung**



**Abbildung 25: Art der beanspruchten Supportleistung**

Auch bei der Frage nach der Defektbehebung dominieren die Herstellerleistungen in der Vertragswerkstatt (63,8 %) und Monteure bzw. mobile Services (18,6 %) (siehe Abbildung 26).

**Behebung des Defekts durch:**



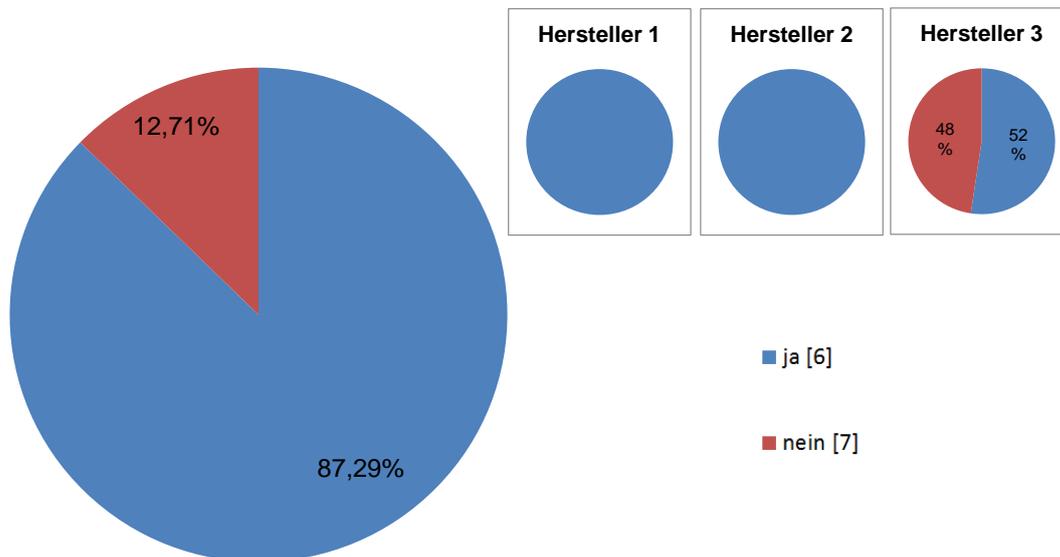
**Abbildung 26: Art der Defektbehebung**

Eine gewisse Verschiebung bei den Prozentwerten ergibt sich durch den Anteil selbst behobener Defekte (17,3 %). Hierbei handelt es sich einerseits um Ausfallursachen, die durch das geschulte Werkstattpersonal der Betreiber in Eigenleistung beseitigt werden konnten, ohne dass hierfür Supportleistungen des Herstellers in Anspruch genommen werden mussten bzw. die nicht unter die Gewährleistung des Herstellers fallen. Im Fall des VU 3 ist zu beachten, dass dort ein Regiewerkstatt-Vertrag mit dem Hersteller abgeschlossen wurde, der sie berechtigt, mit entsprechend geschultem Personal auch Gewährleistungsreparaturen auf Rechnung des Herstellers selbst vorzunehmen (vgl. 0). Ein ähnliches Arrangement besteht für die Betreuung der Fahrzeuge des Herstellers 2 bei drei weiteren Verkehrsbetrieben. Die Datenerfassung erfolgte hier über ein betriebsinternes Datenerfassungssystem, das nicht exakt den Vorgaben der SoFi-Erfassung entsprach und daher hier nicht ausgewiesen sind.

Im Zuge der fortlaufenden Datenauswertung fiel auf, dass bei VU 2 in den letzten sechs Betrachtungsmonaten ein Anstieg selbst durchgeführter Reparaturen zu verzeichnen war (Anteil 22 % → 31 %), während bei den beiden Betreibern mit Full-Service-Verträgen der ursprünglich recht hohe Anteil von Eigenreparaturen deutlich zurückging (Bsp. VU 4: Anteil 27 % → 3 %).

Eine angemessene Erreichbarkeit des Supports wurde mit 87,3 % bestätigt, wobei die Kunden von Hersteller 1 und 2 eine hundertprozentige Zufriedenheit attestierten, während sich der Kunde von Hersteller 3 nur gut zur Hälfte mit der Erreichbarkeit ihres Dienstleisters zufriedengeigte.

## Erreichbarkeit des Supports angemessen?

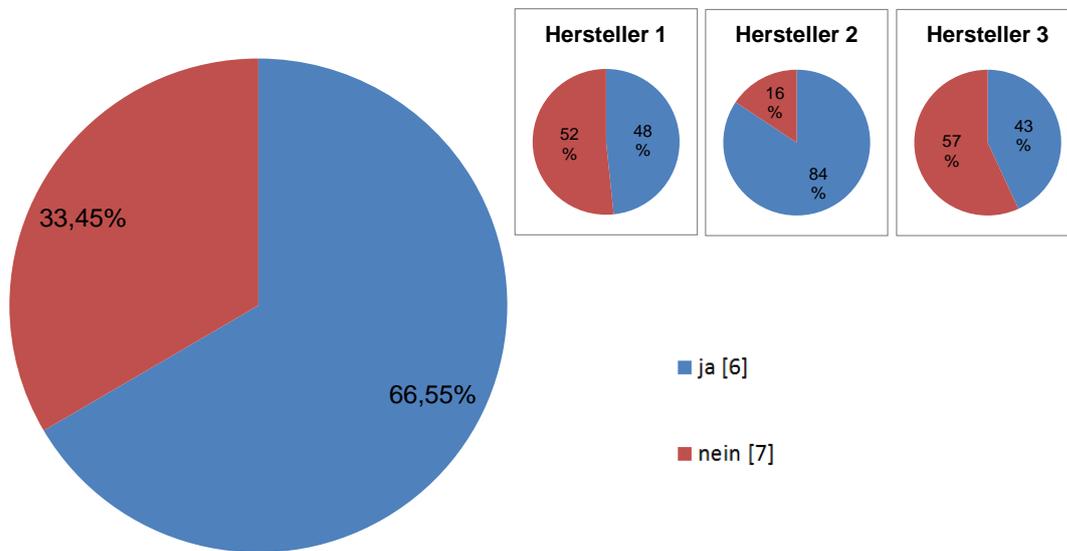


**Abbildung 27: Erreichbarkeit des Supports**

Hierzu sei an dieser Stelle eine Vorwegnahme gestattet: Auch bei den anderen Zufriedenheitskriterien, die nachfolgend noch dargestellt werden, zeigt sich ein ähnliches Bild mit einer guten bis sehr guten Zufriedenheit bei den Kunden von zwei Herstellern und einer unter 50 % liegenden Zufriedenheit mit dem 3. Hersteller. Es ist jedoch zu beachten, dass ausschließlich ein VU im aktuellen Programm Kunde des 3. Herstellers ist. Demnach sind die Angaben hier nicht allgemeingültig, und damit auf Basis der Angaben eines Verkehrsbetriebes auch keine Rückschlüsse auf die allgemeine Servicequalität dieses Herstellers möglich sind. Analog erlauben sich noch keine automatischen Rückschlüsse auf einen grundsätzlich hohen Servicelevel bei einem der Hersteller, da auch hier nur zwei Verkehrsunternehmen mit jeweils einer Kleinflotte von drei Fahrzeugen erfasst werden, die zudem über den Full-Service-Vertrag eine besondere Betreuung erhalten. Die quantitativen Aussagen zum Herstellersupport sollten daher grundsätzlich vor dem Hintergrund der im Einzelfall geringen Stichprobe gesehen und nur zu tendenziellen Einschätzungen herangezogen werden.

Unter Berücksichtigung dieser Einschränkung ergibt sich bei den beiden anderen Support-Kategorien ein recht einheitliches Bild, wie in Abbildung 28 und Abbildung 29 dargestellt.

### War die Reaktionszeit des Supports angemessen?



**Abbildung 28: Reaktionszeit des Supports**

Sowohl bezüglich der Reaktionszeit als auch bei der Frage nach einer adäquaten Problemlösung waren die Betreiber in etwa zwei Drittel der Ereignisse zufrieden, in etwa einem Drittel der Fälle nicht..

In 15 % der Ereignisse waren die Betreiber mit Fahrzeugen von Hersteller 2 nicht mit der Reaktionszeit des Supports einverstanden. Auf Nachfrage im Rahmen der Werkstattleiterbefragung wurde hierzu ergänzt, dass Reparaturen im Zuge der Gewährleistung durch die Vertrags- und Regiewerkstätten häufiger erst nach langwierigen Rücksprachen mit der Konzernzentrale durchgeführt worden sind.

Bei Hersteller 1 wird in rund der Hälfte der Fälle die Reaktionszeit des Support als zu lang bewertet.

Bei Hersteller 3 lag die Unzufriedenheit in beiden Kategorien bei rund 60 %. Auf Nachfrage im Rahmen der Werkstattleiter-Interviews wurde durch den Betreiber auf Stillschweigevereinbarungen in den Vertragswerken mit dem Hersteller verwiesen. Insofern lässt sich leider nicht präzisieren, wo hier die wesentlichen Probleme liegen.

Vorbehaltlich der oben getroffenen Einschränkung muss festgestellt werden, dass beim Kunden des Herstellers 3 der Support noch nicht ausreichend funktioniert. Die Reaktionszeit und Problemlösungsqualität des Hersteller 1 weist ebenfalls Verbesserungspotential auf.

### Wurde das Problem adäquat gelöst?

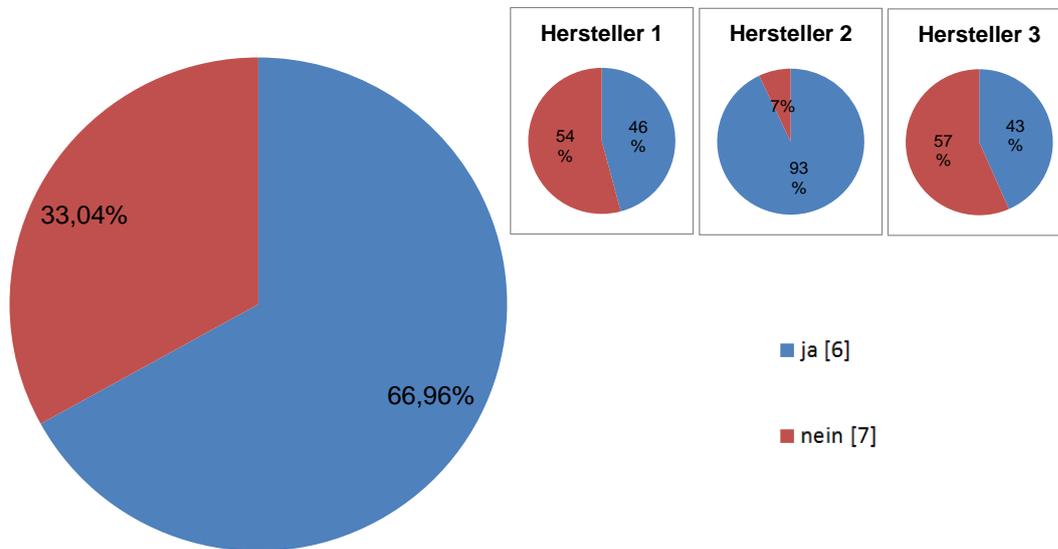


Abbildung 29: Qualität der Problemlösung

#### Ersatzteilversorgung

Gegen Ende des ursprünglichen angedachten Betrachtungszeitraums wurden die Fahrzeughersteller nach ihrer Strategie bei der Ersatzteilbereitstellung für die Hybridbusse und den am häufigsten abgeforderten Ersatzteilen befragt. Hierzu wurde ein Fragebogen entwickelt und im Februar 2015 an die Hersteller versendet. Der Fragebogen mit den gelieferten Rückmeldungen kann in Anhang E eingesehen werden.

Leider blieb diese Befragung durch das Unternehmen 1 unbeantwortet, so dass hier keine Aussagen über die Ersatzteilstrategie getroffen werden können. Einzig die Rückäußerungen der beiden Betreiber mit Fahrzeugen dieses Herstellers lassen die Einschätzung zu, dass es wohl zu keinen signifikanten Problemen bei der Ersatzteilversorgung kommt.

Bei Hersteller 2 und 3 gibt man an, dass die Ersatzteilversorgung der Hybridbusse nicht von der für konventionelle Fahrzeuge abweicht. Sie erfolgt über das unternehmenseigene Zentrallager, bei Hersteller 3 zusätzlich durch regionale Verteillager und lokale Vertragspartner, bei Hersteller 2 auch über die Vertragswerkstätten.

Während Hersteller 3 eine – recht lange – Bereitstellungszeit der Ersatzteile von 30 Tagen einräumt, gibt es hier bei Hersteller 2 keine pauschale Aussage. Dort sind aber offenbar individuelle Vereinbarungen mit den Betreibern getroffen worden (vgl. Betreiberfragebögen und –interview in 0).

Unterschiede zeigen sich bei der Vorhaltung von Komponenten bei den beiden Herstellern: Hersteller 2 hält als einziger Hersteller (vgl. auch den Abschlussbericht zur begleitenden Prüfprogramm 2011/12) einen kompletten Hybridantriebsstrang als Ersatzkomponente vor. Gleiches gilt für Traktionsenergiespeichersysteme. Hier bevorratet Hersteller 2 sowohl Batteriepacks und –module als auch Batteriekühlsysteme und Batterimanagementsysteme.

Jedoch gibt Hersteller 2 an, dass die am häufigsten angeforderten Ersatzteile übliche Wartungsteile aus dem konventionellen Busbereich seien. Die Anforderung hybridspezifischer Ersatzteile sei dagegen selten. Ähnlich verhält es sich bei Hersteller 3 – die hier benannten häufigsten Ersatzteilanforderungen sind zumeist nicht hybridspezifisch. Allerdings wurden dort häufiger Batterielüfter nachgefordert, von denen daher auch zwei ständig abrufbereit im Zentrallager liegen.

#### **5.2.4 Kraftstoffverbrauch und Klimaschutzwirkung während des Praxisbetriebs (thinkstep)**

Im Folgenden werden die Ergebnisse aus der Betriebsdatenerfassung zum Kraftstoffverbrauch dargestellt. Bei der Interpretation der Ergebnisse sind die nachfolgend genannten Randbedingungen zu berücksichtigen.

##### *Vergleichbarkeit Diesel- und Hybridfahrzeuge*

Für den Vergleich der Kraftstoffverbräuche zwischen den Hybridbussen und den Diesel-Referenzfahrzeugen ist neben dem Antriebskonzept der technische Stand der Fahrzeuge relevant. Für eine gute Vergleichbarkeit entspricht idealerweise das Referenzfahrzeug in technischer Ausstattung (z.B. Abgasnorm, Klimatisierung) und Alter möglichst den Charakteristika des Hybridfahrzeuges. Während es sich bei den Hybridfahrzeugen in allen Fällen um geförderte Neufahrzeuge handelt, haben die zum Vergleich herangezogenen Dieselfahrzeuge in den meisten Fällen bereits eine gewisse Laufleistung erreicht, so weist z. B. das Referenzfahrzeug bei VHH zu Beginn der Datenerfassung eine Laufleistung von über 100.000 km auf. Zudem ist zu beachten, dass bei den 4 Hamburger Verkehrsunternehmen und bei der üstra im Falle der Gelenkfahrzeuge Busse verschiedener Hersteller zum Einsatz kommen, wobei alle Referenzbusse mindestens die Abgasnorm Euro V erfüllen und damit dem Stand der Technik entsprechen. Bei den übrigen drei Betreibern (WVG, üstra (Solobusse), SBI) stammen Hybrid- und Dieselfahrzeuge von demselben Hersteller.

##### *Linienreiner Einsatz*

Grundlage der Untersuchungen zum Kraftstoffverbrauch der Hybridbusse ist der direkte Vergleich zwischen den Betriebsdaten der Hybridbusse und den Daten der parallel erfassten konventionellen Dieselfahrzeuge. Der linienreine Einsatz ist gerade im Hinblick auf die Ermittlung der erzielten Kraftstoffeinsparung der Hybridbusse gegenüber den konventionellen Dieselfahrzeugen wünschenswert, da so die Streuung des Kraftstoffverbrauchs über die verschiedenen Linien entfällt. Ein linienreiner Vergleich über einen längeren Zeitraum ermöglicht schlicht den besten Vergleich hinsichtlich des Kraftstoffverbrauchs.

Aufgrund der Betriebsplanung bei den teilnehmenden Verkehrsbetrieben ist nur bei der üstra ein auswertbarer linienreiner Einsatz von Hybrid- und Referenzfahrzeugen gegeben. Die Datenerfassung erfolgt hier seit April 2014. Die übrigen Daten stammen von Fahrten auf verschiedenen Linien bzw. dem Einsatz im kompletten Netz der Betreiber.

In Ingolstadt erfolgt der Einsatz in der Regel auf Linienkombinationen, d. h. die Fahrzeuge sind tageweise auf einer Kombination von Linien unterwegs. In dem von SBI angegebenen Linienbündel 10/11/X11 das überwiegend bedient wird, werden durchschnittliche Reisegeschwindigkeiten von 20,1 km/h erreicht. Werden jedoch in den Fahrzeugumläufen weitere, aus dem

flachen Innenstadtbereich hinausgehende Linien bedient, steigen sowohl die Geschwindigkeit als auch die Einordnung in die Topografiekategorie an.

Bei Jasper und Süderelbe werden die Busse immer auf denselben „Linienbouquets“ eingesetzt, d. h. ausgewählten Linien, die jedoch nicht tageweise getrennt erfasst werden (siehe Tabelle 12). Davon werden bei Jasper 11 der Geschwindigkeitsklasse SORT 2 (15,0 – 21,12 km/h) und 3 Linien der Klasse SORT 3 (> 21,15 km/h) entsprechend der UITP Klassifizierung [UITP 2009] zugeordnet. Die resultierende Durchschnittsgeschwindigkeit bei Jasper beträgt 20,2 km/h. Aus dem Betriebshof der SBG heraus werden 24 Linien bedient, von denen 13 SORT 2 entsprechen und 11 Linien SORT 3. Insgesamt ergibt sich im Vergleich zu Jasper eine höhere Durchschnittsgeschwindigkeit (21,8 km/h) über alle Linien der SBG. Vom Betreiber werden die Linien von Jasper auch als „(Vor)Stadtverkehr“ und von SBG als „Überlandverkehr“ beschrieben. Topografisch sind die Strecken ähnlich einzuordnen und werden vom Betreiber als flach beschrieben mit geschätzt maximal 15-20 m Höhenunterschied im gesamten Netz.

**Tabelle 12: Übersicht der bedienten Linien bei Jasper und SBG**

Linie	Ø Haltestellenabstand	Ø Geschwindigkeit	SORT-Zuordnung	Linie	Ø Haltestellenabstand	Ø Geschwindigkeit	SORT-Zuordnung
Betriebshöfe Jasper (12 Linien)				Betriebshof Süderelbe SBG (24 Linien)			
23	475 m	17,33 km/h	SORT 2	141	504 m	19,10 km/h	SORT 2
213	448 m	16,43 km/h	SORT 2	142	362 m	15,29 km/h	SORT 2
112	449 m	16,11 km/h	SORT 2	143	423 m	18,13 km/h	SORT 2
118	389 m	18,06 km/h	SORT 2	144	376 m	18,20 km/h	SORT 2
116	472 m	17,65 km/h	SORT 2	145	385 m	18,40 km/h	SORT 2
160	451 m	20,58 km/h	SORT 2	150	750 m	28,42 km/h	SORT 3
161	442 m	19,05 km/h	SORT 2	151	722 m	25,45 km/h	SORT 3
260	496 m	21,21 km/h	SORT 3	152	446 m	21,18 km/h	SORT 3
261	434 m	17,94 km/h	SORT 2	153	774 m	27,57 km/h	SORT 3
130	420 m	19,81 km/h	SORT 2	154	467 m	20,33 km/h	SORT 2
230	459 m	24,45 km/h	SORT 3	156	387 m	19,41 km/h	SORT 2
330	464 m	24,77 km/h	SORT 3	240	410 m	20,16 km/h	SORT 2
<i>Min</i>	<i>389 m</i>	<i>16,1 km/h</i>		241	470 m	17,36 km/h	SORT 2
<i>Max</i>	<i>496 m</i>	<i>24,8 km/h</i>		245	385 m	17,87 km/h	SORT 2
				249	485 m	29,42 km/h	SORT 3
				250	683 m	25,77 km/h	SORT 3
				251	455 m	19,70 km/h	SORT 2
				254	369 m	22,15 km/h	SORT 3
				351	542 m	29,98 km/h	SORT 3
				354	777 m	24,45 km/h	SORT 3
				355	456 m	23,83 km/h	SORT 3
				440	294 m	15,54 km/h	SORT 2
				540	429 m	20,02 km/h	SORT 2
				641	492 m	25,65 km/h	SORT 3
				<i>Min</i>	<i>294 m</i>	<i>15,3 km/h</i>	
				<i>Max</i>	<i>777 m</i>	<i>30,0 km/h</i>	

Bei VHH werden die Fahrzeuge auf 57 Linien eingesetzt. Eine linienbezogene Charakterisierung macht hier also keinen Sinn, analog zu den Linien von Jasper und SBG kann die Topographie als flach charakterisiert werden. Nur im Gebiet nördlich von Bergedorf treten Geländehöhen bis etwa 40 m über NN auf, die aber in der Bewertung des Linienverlaufs bis auf einzelne Ausnahmen nicht zu einer Einstufung in eine höhere Topografiekategorie führen.

#### *Datenverfügbarkeit/Erfassungszeitraum*

Es konnten von allen Betreibern mit Ausnahme der Hamburger Hochbahn jeweils Fahrdaten für mindestens 18 Monate erfasst werden, gerade auch um Einflüsse wie z.B. temperaturbedingte Schwankungen im Kraftstoffverbrauch (Fahrgastraumbeheizung im Winter, Klimatisierung der Batterie im Sommer etc.) zu berücksichtigen.

Aufgrund der früheren Langzeitdatenerfassung über die AG Bus im Fall von Jasper und SBG sind hier Daten für rund 2 Jahre verfügbar. Lediglich von der Hochbahn liegen nur Daten für neun Monate vor, da hier die Fahrzeuge erst im Laufe des Dezembers 2014 in den Linieneinsatz gegangen sind.

Der Kraftstoff- bzw. Energiebedarf für die Zusatzheizung wurde von Jasper (ab Okt 2014), der SBG und der Hochbahn separat ausgewiesen. Die VHH verfügt ebenfalls über einen separaten Heizöltank, für den Heizölverbrauch sind allerdings keine Daten verfügbar. Die Fahrzeuge bei den übrigen Betreibern sind nicht mit einem separaten Heizöltank ausgerüstet, d.h. der Kraftstoffverbrauch der Zusatzheizung ist in den Verbrauchsdaten von WVG, üstra und SBI inkludiert.

#### *Statistik*

Bezogen auf die Einsatztage können im Linienmischbetrieb sehr heterogene Tagesverbräuche (bedingt durch unterschiedliche Streckenführung und Topographie der jeweils befahrenen Linien) resultieren. Für die Übersicht der Kraftstoffverbräuche wurde der netz- bzw. linienbezogene Verbrauch anhand der Gesamtbetankung und Gesamtfahrleistung über alle Erfassungsmonate bestimmt.

Entsprechend der unterschiedlichen Zahl an Fahrzeugen und Datenverfügbarkeit basiert die Auswertung der Verbrauchsdaten auf unterschiedlichen Laufleistungen je Bus bzw. Betreiber (siehe auch Tabelle 9 in Kapitel 5.2.1).

Bei allen Betreibern befindet sich zudem eine geringere Zahl von Diesel-Referenzfahrzeugen als von Hybridfahrzeugen in der Erfassung (siehe Tabelle 7). Dadurch ist die Datenbasis für die Antriebskonzepte entsprechend unterschiedlich.

Tabelle 13 zeigt den durchschnittlichen absoluten Kraftstoffverbrauch je Betreiber sowie die relative Kraftstoffeinsparung der Hybridbusse im Vergleich zu den Dieselfahrzeugen.

Tabelle 13: Einsatzcharakteristik und Kraftstoffverbrauch

Fahrzeug	Verkehrsbetrieb	Daten	Linie	Ø Fahrgeschw.	Ø Haltestellenabstand	$\Delta h_{sp}^{1)}$ [m/km]	Kraftstoffverbrauch [l/100km]			
							ohne Zusatzheizung	mit Zusatzheizung		
<b>Dieselbusse</b>	<b>Solo Mercedes</b>	Jasper	09/13-09/15	Netz	20,2 km/h	452 m :a.	2-4 m/km	44,0	44,8	
		VHH	03/14-03/15	Netz	21 km/h	400 m :a.	2-4 m/km	41,9	--	
		Hochbahn	01/15-09/15	Netz	19,4 km/h	400 m :a.	2-4 m/km	37,3	37,9	
		SBG	09/13-09/15	Netz	21,8 km/h	493 m :a.	2-4 m/km	34,9	35,7	
	<b>Solo Solaris</b>	üstra	04/14-09/15	Netz	22,2 km/h	563 m	0,0 m/km		37,7	
	<b>Solo MAN</b>	SBI	03/14-09/15	Netz	20,1 km/h	552 m	1,8 m/km		42,5	
		WVG	08/14-09/15	Netz	26,5 km/h	733 m	ca. 5 m/km		35,4	
	<b>Gelenk Mercedes</b>	Hochbahn	01/15-09/15	109	19,4 km/h	400 m	9 m/km	55,7	56,8	
	<b>Gelenk MAN</b>	üstra	04/14-09/15	Netz	22,2 km/h	563 m :a.	2-6 m/km		55,7	
		üstra	04/14-09/15	üstra 121	19,5 km/h	399 m	5,7 m/km		62,2	
	<b>Solo Mercedes</b>	Minimum Netz							34,9	35,7
		Maximum Netz							44,0	44,8
		Mittelwert Praxiseinsatz (ohne Gewichtung Laufleistung)							39,5	39,5
	<b>Solo Solaris</b>	Mittelwert Praxiseinsatz (ohne Gewichtung Laufleistung)							k. Wert	37,7
	<b>Solo MAN</b>	Mittelwert Praxiseinsatz (ohne Gewichtung Laufleistung)							k. Wert	39,0
	<b>Gelenk Mercedes</b>	Mittelwert Praxiseinsatz (ohne Gewichtung Laufleistung)							55,7	56,8
	<b>Gelenk MAN</b>	Mittelwert Praxiseinsatz (ohne Gewichtung Laufleistung)							k. Wert	58,9
	<b>Hybridbusse</b>	<b>Solo Volvo</b>	Jasper	09/13-09/15	Netz	20,2 km/h	452 m :a.	2-4 m/km	33,8	34,6
			VHH	03/14-03/15	Netz	21 km/h	400 m :a.	2-4 m/km	30,7	--
			Hochbahn	01/15-09/15	Netz	19,4 km/h	400 m :a.	2-4 m/km	32,0	33,6
SBG			09/13-09/15	Netz	21,8 km/h	493 m :a.	2-4 m/km	28,2	29,1	
<b>Solo Solaris</b>		üstra	04/14-09/15	Netz	22,2 km/h	563 m	0,0 m/km		27,5	
<b>Solo MAN</b>		SBI	03/14-09/15	Netz	20,1 km/h	552 m	1,8 m/km		31,7	
		WVG	08/14-09/15	Netz	26,5 km/h	733 m	ca. 5 m/km		28,4	
<b>Gelenk Volvo</b>		Hochbahn	01/15-09/15	109	19,4 km/h	400 m :a.	2-4 m/km	42,6	46,1	
<b>Gelenk Solaris</b>		üstra	04/14-09/15	Netz	22,2 km/h	563 m :a.	2-6 m/km		44,3	
		üstra	04/14-09/15	üstra 121	19,5 km/h	399 m	5,7 km/h		47,2	
<b>Solo Volvo</b>		Minimum Netz							28,2	29,1
		Maximum Netz							33,8	34,6
		Mittelwert Praxiseinsatz (ohne Gewichtung Laufleistung)							31,2	32,4
<b>Solo Solaris</b>		Mittelwert Praxiseinsatz (ohne Gewichtung Laufleistung)							k. Wert	27,5
<b>Solo MAN</b>		Mittelwert Praxiseinsatz (ohne Gewichtung Laufleistung)							k. Wert	30,0
<b>Gelenk Volvo</b>		Mittelwert Praxiseinsatz (ohne Gewichtung Laufleistung)							42,6	46,1
<b>Gelenk Solaris</b>		Mittelwert Praxiseinsatz (ohne Gewichtung Laufleistung)							k. Wert	44,3

Zu beachten: Hochbahn Fahrzeuge Daten für 9 Monate

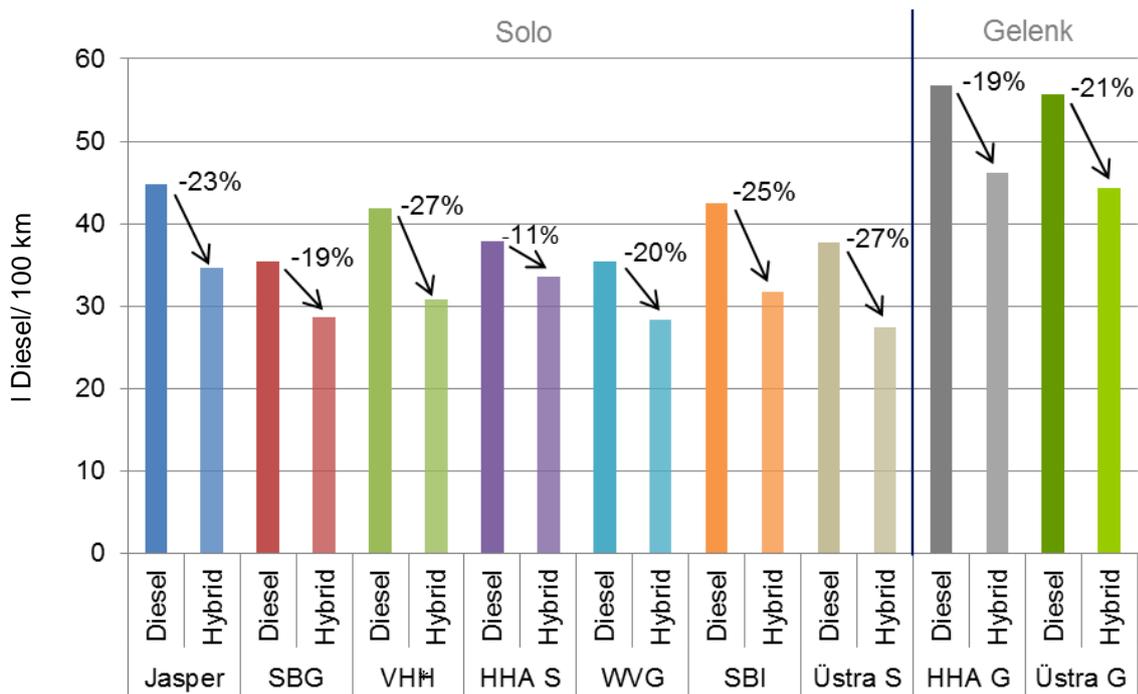
Tabelle 13: Einsatzcharakteristik und Kraftstoffverbrauch - Fortsetzung

Fahrzeug	Verkehrsbetrieb	Daten	Linie	Ø Fahr-geschw.	Ø Halte-stellen-abstand	$\Delta h_{sp}$ <sup>1)</sup> [m/km]	Kraftstoffver-bruch [l/100km]	
							ohne Zusatz-heizung	mit Zusatz-heizung
Hybrid- vs. Dieselbusse,	Solo Volvo vs. Solo Mercedes	Jasper 09/13-09/15	Netz	20,2 km/h	452 m :a.	2-4 m/km	-23,2%	-22,8%
	VHH 03/14-03/15	Netz	21 km/h	400 m :a.	2-4 m/km	-26,6%	-	
relativ	Solo Solaris	Hochbahn 01/15-09/15	Netz	19,4 km/h	400 m :a.	2-4 m/km	-14,1%	-11,4%
		SBG 09/13-09/15	Netz	21,8 km/h	493 m :a.	2-4 m/km	-19,2%	-18,5%
	Solo MAN	üstra 04/14-09/15	Netz	22,2 km/h	563 m	0,0 m/km		-27,2%
	Gelenk Volvo vs. Gelenk Mercedes	SBI 03/14-09/15	Netz	20,1 km/h	552 m	1,8 m/km		-25,4%
		WVG 08/14-09/15	Netz	26,5 km/h	733 m	ca. 5 m/km		-19,8%
	Gelenk Solaris vs. Gelenk MAN	Hochbahn 01/15-09/15	109,0	19,4 km/h	400 m :a.	2-4 m/km	-23,6%	-18,8%
		üstra 04/14-09/15	Netz	22,2 km/h	563 m :a.	2-6 m/km		-20,5%
	Solo Volvo	üstra 04/14-09/15	üstra 121	19,5 km/h	399 m	5,7 m/km		-24,0%
		Minimum					-26,6%	-22,8%
		Maximum					-19,2%	-18,5%
		Mittelwert Praxiseinsatz (ohne Gewichtung Laufleistung)					-23,0%	-20,7%
	Solo Solaris	Mittelwert Praxiseinsatz (ohne Gewichtung Laufleistung)					k. Wert	-27,2%
	Solo MAN	Mittelwert Praxiseinsatz (ohne Gewichtung Laufleistung)					k. Wert	-22,6%
	Gelenk Volvo	Mittelwert Praxiseinsatz (ohne Gewichtung Laufleistung)					-23,6%	-18,8%
	Gelenk Solaris	Mittelwert Praxiseinsatz (ohne Gewichtung Laufleistung)					k. Wert	-22,3%

<sup>1)</sup> spezifische Höhendifferenz; zu überwindende Höhenmeter pro Kilometer

Im Vergleich zum Vorprojekt zeigt sich eine insgesamt höhere Verbrauchseinsparung. So liegt der Kraftstoffbedarf der Hybridbusse um 11 bis 27 % unter dem Bedarf der Diesel-Referenzbusse (siehe Abbildung 30). Bei einem Verkehrsbetrieb (VHH) beruht der Vergleich auf reinen Fahrdieselvebrauchsdaten der Hybrid- und Dieselbusse (ohne Heizölverbrauch).

Im Fall der Solohybrid Fahrzeuge bei der Hochbahn, die der Euro VI Norm entsprechen, kommt ebenfalls ein Euro VI Fahrzeug als Referenzfahrzeug zum Einsatz, das mit Rekuperationsmodul ausgestattet ist. Dieser Fahrzeugtyp weist laut Betreiberaussage gegenüber herkömmlichen Euro V Dieselbusse einen um 4-7% niedrigeren Verbrauch auf. Im Zusammenspiel mit dem Umstand, dass zum einen bisher erst Daten für 9 Monate vorliegen und zum anderen die Hybridbusse bei der Hochbahn im Stadtverkehr mit etwas niedrigeren Durchschnittsgeschwindigkeiten eingesetzt werden, ergibt sich die etwas geringere Kraftstoffeinsparung von -11% im Vergleich zu den anderen Betreibern mit Solohybridbussen.



\* Nur Fahrdieselvebrauch für Hybrid- und Dieselbusse erfasst, ohne Heizdiesel

**Abbildung 30: Durchschnittlicher Kraftstoffbedarf Diesel- und Hybridbusse je Betreiber**

In Abbildung 31 ist die mittlere monatliche Einsparung der Hybrid- gegenüber den Referenzbussen nach Betreiber zusammen mit der Außentemperatur dargestellt. Dabei zeigt sich, dass selbst bei einer Außentemperatur unter 5 °C noch Einsparungen von z. T. über 25 % erzielt werden können. Es zeigt sich, dass die relative Einsparung bei niedrigen Temperaturen tendenziell geringer ausfällt (z.B. bei Jasper, SBG und Ingolstadt). Für die VHH ist ein solcher Trend nicht zu erkennen, allerdings wurde hier auch der Heizölverbrauch nicht erfasst.

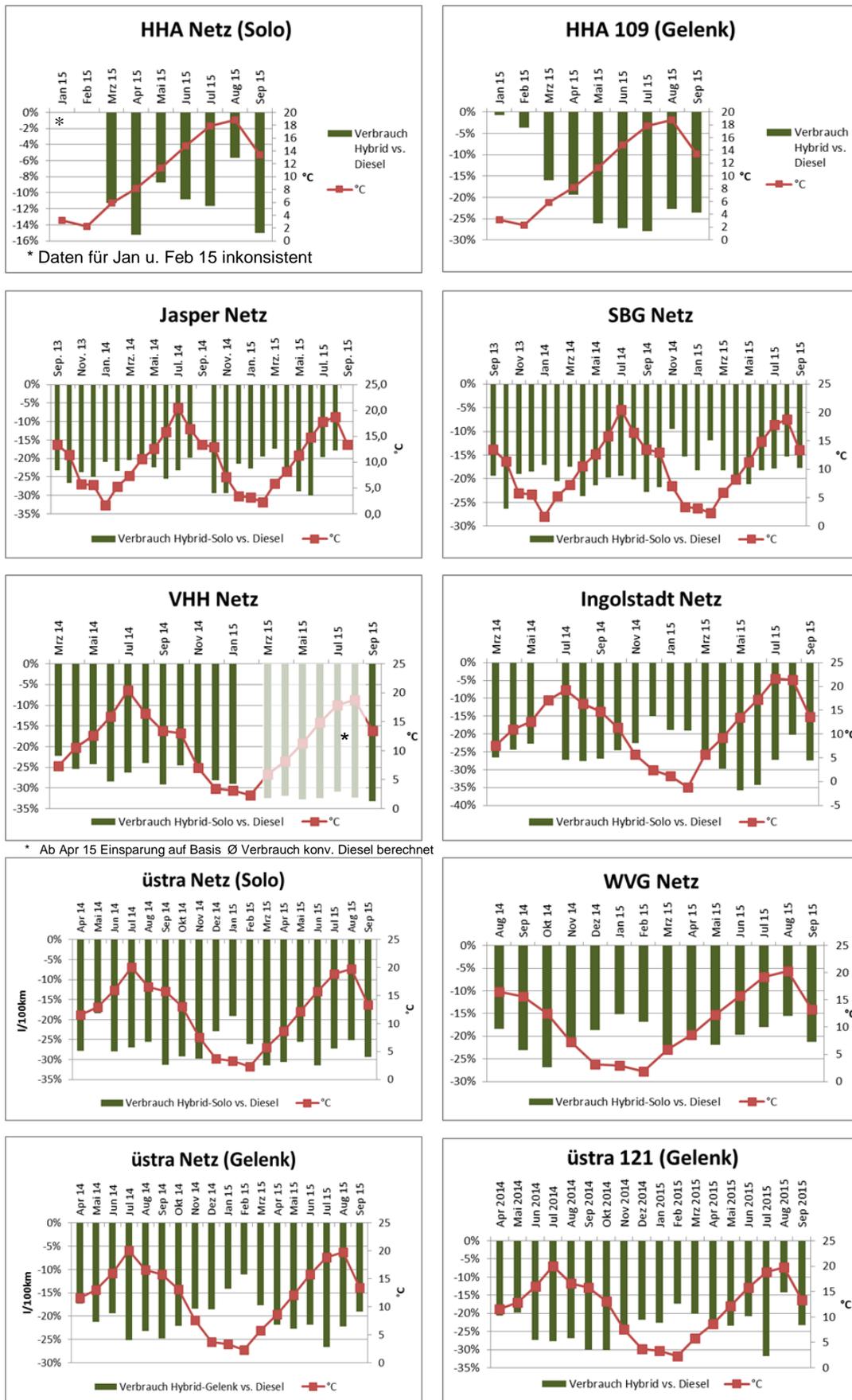


Abbildung 31: Kraftstoffeinsparung Hybrid- vs. Dieselsebuse je Betreiber

### Klimaschutzwirkung

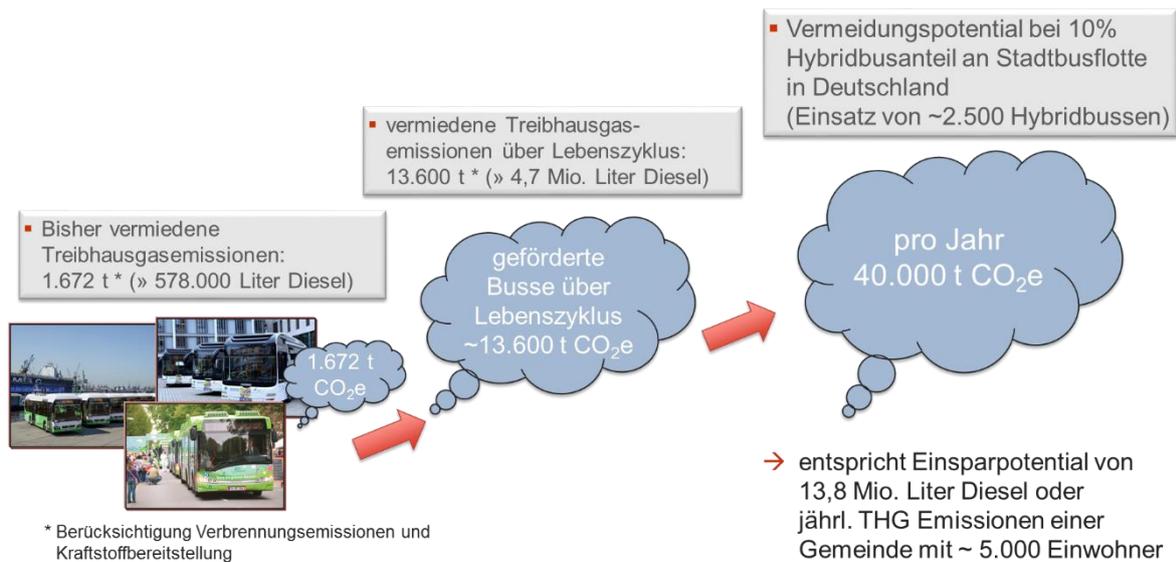
Entsprechend den bisher erzielten Laufleistungen und Verbrauchseinsparungen ergeben sich die in Tabelle 14 dargestellten Klimaschutzwirkungen aus dem Betrieb der Hybridbusse. Bisher wurden mit dem neunmonatigen bis zweijährigen Betrieb ca. 580.000 l Diesel eingespart bzw. eine Klimaschutzwirkung von ca. 1.700 t vermiedenen Treibhausgasen (in CO<sub>2</sub> Äquivalenten) erzielt.

**Tabelle 14: Klimaschutzwirkung durch den Einsatz der Hybridbusse**

	<b>BMUB geförderte Hybridbusse</b>
eingesparter Kraftstoff je 100 Fzg.km (mit Zusatzheizung)	-11,4 bis -4,3
Durchs. monatliche Fahrleistung je Bus	5.372
Anzahl Busse	69
Anzahl Monate in Betrieb	9 bis 25
bisher erzielte Fahrleistung	6.242.813
<b>Bisher eingesparte Dieselmenge in l</b>	<b>-577.857</b>
<b>Bisher eingesparte THG in t</b>	<b>-1.672</b>
berechnete jährliche Fahrleistung je Bus	64.466
Gewählte jährliche Fahrleistung	60.000
eingesparte Dieselmenge p.a. in l	-392.389
eingesparte THG p.a. in t	-1.135
<b>eingesparte Dieselmenge über 12 Jahre in l</b>	<b>-4.708.667</b>
<b>eingesparte THG über 12 Jahre in t</b>	<b>-13.622</b>

Der Betrieb aller 76 Hybridbusse, die im Rahmen des Begleitprüfprogramms betrachtet werden, ergibt sich unter der Annahme, dass die bisherigen Einsparungen je gefahrenen km über eine mit 12 Jahren angesetzten Lebensdauer erreicht werden, eine Vermeidung in der Größenordnung von 13.600 t Treibhausgasen bzw. eine Kraftstoffersparnis von rund 4,7 Mio. l Diesel (siehe Abbildung 32).

Das Potenzial der Technologie lässt sich anhand einer einfachen, überschlägigen Abschätzung veranschaulichen. Unterstellt man einen Anteil von 10 % Hybridbussen an der Stadtbusflotte in Deutschland (ca. 25.000 Busse), ergibt sich aus dem Betrieb von 2.500 Hybridbussen ein jährliches Einsparpotenzial von ca. 40.000 t CO<sub>2</sub>e oder den Treibhausgasemissionen einer Gemeinde mit 5.000 Einwohnern.



**Abbildung 32: Treibhausgase – bisher erzielte Einsparungen und Einsparpotenzial**

### 5.2.5 Umfang rein elektrischer Betrieb / Erfahrungen aus dem Linienbetrieb (VCDB)

Hybridbusse mit serielltem Antriebssystem – und in eingeschränktem Umfang auch solche mit Parallelhybridsystem – verfügen über die Möglichkeit des rein elektrischen Fahrbetriebs, d. h. des Fahrens bei abgeschaltetem Dieselmotor mit der Energie aus den Speichermedien. Bei akkulatorbasierten Energiespeichersystemen kann die Reichweite des rein elektrischen Fahrbetriebs wenige Kilometer erreichen, bei Hochleistungskondensatoren (Supercaps) einige hundert Meter.

Im Hinblick auf die Energie- und damit die Kraftstoffeffizienz, ist der rein elektrische Betrieb nur dann erstrebenswert, wenn die verwendete Energie nicht erst über den Verbrennungsmotor erzeugt wurde und damit entsprechenden Wandlungsverlusten unterlag, sondern durch Rekuperation beim Bremsen ohne Kraftstoffeinsatz zurückgewonnen wurde. Insofern ist die jeweilige Betriebsstrategie eines Hybridbusherstellers üblicherweise nicht auf Maximierung des Null-Emissionsbetriebes ausgelegt, sondern auf eine Maximierung der Energieeffizienz und damit der Kraftstoffersparnis. Mit der Festlegung des Antriebskonzeptes, Parallel- oder Seriell-Hybrid, erfolgt bereits eine grundsätzliche Festlegung hinsichtlich der Möglichkeit bzw. Eignung zum rein elektrischen Fahren. Während wie eingangs erwähnt beim seriellen Hybrid im Wesentlichen die Größe des Energiespeichers die elektrische Reichweite bestimmt, ist beim Parallel-Hybrid der rein elektrische Betrieb, wenn überhaupt vorgesehen, auf bestimmte Fahrzustände wie zum Beispiel Anfahrvorgänge beschränkt. Damit fällt der Anteil des rein elektrischen Fahrens bei Bussen mit Parallel-Hybrid im Vergleich zu seriellen Hybridbussen prinzipbedingt niedriger aus.

Auch im Hinblick auf die Lebensdauer des Energiespeichers, vor allem bei den Batteriebasierten Energiespeichern, ist das rein elektrische Fahren mit Hybridbussen nicht als optimal zu bewerten, da hierbei die Speicher, die eigentlich für das Ausgleichen von Leistungsspitzen beim Anfahren aus dem Stillstand optimiert sind, verhältnismäßig stark beansprucht werden. Gleichwohl gibt es besondere Fahrsituationen, in denen das Abschalten des Diesellaggregats

gewünscht ist, beispielsweise beim Passieren von Krankenhäusern oder bei enger verkehrlicher Verflechtung mit Fußgängerströmen, wie es in Fußgängerzonen der Fall ist. Hier kann das Reduktionspotenzial bezüglich Lärm und Schadstoffen im rein elektrischen Betrieb genutzt werden.

Dies sind die wesentlichen Gründe für eine Betrachtung des rein elektrischen Fahrbetriebs in diesem Projekt.

Das methodische Vorgehen sieht zunächst eine Offline-Analyse der im Programm enthaltenen Bustypen auf Basis von Herstellerinformationen vor. Diese zielt im Wesentlichen darauf ab, einen Sollwert der rein elektrischen Fahrleistung zu ermitteln. Weiterhin erfolgt eine Erhebung der installierten Speicherkapazitäten, die eine näherungsweise Aussage über die zu erwartende Reichweite im rein elektrischen Betrieb auf Basis von Standardparametern zulassen.

Der Fragebogen für die Hersteller-Befragung wurde entwickelt und im April an die drei im Vorhaben vertretenen Anbieter übergeben.

Zur Verifizierung der Herstellerangaben wurde anschließend eine Befragung der Betreiber über deren Erfahrungen mit dem rein elektrischen Betrieb erfolgen. Mit dem verzögerten Befragungsstart der Verkehrsunternehmen sollte sichergestellt werden, dass ein ausreichender Erfahrungsschatz aus dem täglichen Linieneinsatz vorliegt, um die Fragen zum betrieblichen Verhalten der Fahrzeuge zuverlässig beantworten zu können. Die Befragung der Betreiber zum rein elektrischen Fahren wurde zum Jahresende 2014 durchgeführt, die Rückläufe lagen zum Januar 2015 vollständig vor, die Ergebnisse sind in einer Tabelle in Anhang E zusammengefasst.

Grundsätzlich wurde festgestellt, dass bei den Betreibern erwartungsgemäß ein solider Informationsstand darüber herrscht, was die jeweils eingesetzten Hybridbusse in Bezug auf rein elektrisches Fahren können, und was nicht. Dies dokumentiert sich in den komplett übereinstimmenden Angaben von Herstellern und Verkehrsunternehmen zu den Möglichkeiten des rein elektrischen Betriebs und dessen Einleitung. Dieser gute Informationsstatus vermeidet falsche Erwartungshaltungen an das Fahrzeug und beugt Fehlbedienungen vor.

Von den im Programm befindlichen Hybridbussen sind alle Fahrzeuge von MAN und Volvo in der Lage, kurze Strecken rein elektrisch zurückzulegen. Bei Solaris ist dies systemseitig nicht vorgesehen.

Der elektrische Fahrbetrieb wird bei allen Fahrzeugen, bei denen er möglich ist, automatisch eingeleitet. Eine aktive Einleitung durch den Fahrer ist nicht vorgesehen. Bei den Volvo-Fahrzeugen wird ausschließlich beim Anfahren aus dem Stillstand rein elektrischer Fahrbetrieb eingeleitet, die MAN-Hybridbusse wechseln laut Herstellerankunft bei ausreichendem Ladezustand der Traktionsenergiespeicher (Hochleistungskondensatoren) auch während der Fahrt in den Elektromodus. Dies deckt sich mit den Beobachtungen der Betreiber in Ingolstadt und Wolfsburg.

Volvo weist in seiner Rückantwort nochmals explizit auf das Abschalten des Dieselmotors in Abhängigkeit vom Ladezustand des Energiespeichers hin. Es gibt jedoch in allen Volvo-Hybridbustypen einen Schalter, der das rein elektrische Fahren im Betriebshof auch unabhängig vom Ladezustand der Traktionspeicher gestattet. Aus Gründen der Batterielebensdauer sollte von dieser Option jedoch sparsam Gebrauch gemacht werden.

Mit Ausnahme des Volvo 7900 Hybrid in der 18-m-Ausführung werden herstellerseitig rein elektrische Fahrstrecken bis 500 m angegeben, beim Volvo Gelenkzug bis zu 2 km (bei max. 23 km/h). Interessant ist, dass der MAN-Betreiber WVG sogar Fahrweiten ohne Verbrennungsmotor von 500 bis 1.000 m angibt. Dies kann natürlich Ursachen in der subjektiven Wahrnehmung und Einordnung in eine bestimmte Kategorie durch den Betreiber haben (falls bspw. eine Strecke von 450 m als über 500 m eingeschätzt wird) und sollte nicht überbewertet werden.

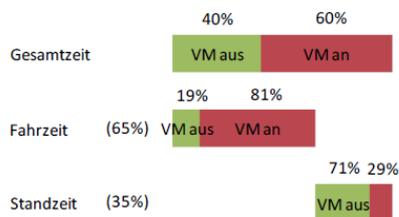
Neben der Befragung der Hersteller und Betreiber zum rein elektrischen Betrieb wurden von den Herstellern Volvo und MAN auch Auswertungen von Betriebsdaten bereitgestellt.

Als erstes Beispiel wurde von MAN für die seriellen Solohybridbusse der Anteil rein elektrischen Fahrens einmal für ein EEV Fahrzeug und einmal für ein Euro VI Fahrzeug ausgewertet. Hierzu wurden für das EEV Fahrzeug verfügbare Daten für einen Zeitraum von 12 Monaten (Januar bis Dezember 2012) und das Euro VI Fahrzeug Daten für mehr als 4 Monate (seit Q3 2014) ausgewertet. Der verbaute Energiespeicher basiert auf Hochleistungskondensatoren und verfügt über einem nutzbaren Energieinhalt von 0,4 kWh. Im Falle des EEV Fahrzeuges ist in 40% der gesamten Betriebszeit der Dieselmotor aus bzw. bei Betrachtung der Standzeit z.B. an Haltestellen und Ampeln) in 71% der Zeit (siehe Abbildung 33). Für das Euro VI Fahrzeug konnte dieser Anteil noch weiter gesteigert werden so ist hier der Motor in 52% der erfassten Betriebszeit aus, während der Standzeit sogar in 94% der Zeit. Streckenbezogen konnte ein Anteil von 22% rein elektrisch zurückgelegt werden. Auch wenn die Einsatzbedingungen für die beiden Fahrzeuge nicht unmittelbar miteinander vergleichbar sind, wird mit den gemachten Angaben das Minderungspotenzial hinsichtlich Lärm und Schadstoffemissionen aufgrund des rein elektrischen Betriebs veranschaulicht.

Auswertung Messungen Motorstopp

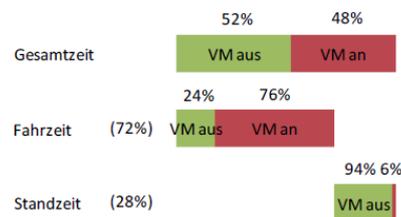
**Fahrzeug: Lion's City Hybrid EEV**

- Einsatz: Kundeneinsatz
- Zeitraum: 01.01.2012 – 31.12.2012  
(Laufleistung: 54.000km)
- Streckenanteil rein el. Fahren: nicht erfasst
- Zeitanteile Motorstopp:



**Fahrzeug: Lion's City Hybrid EU VI**

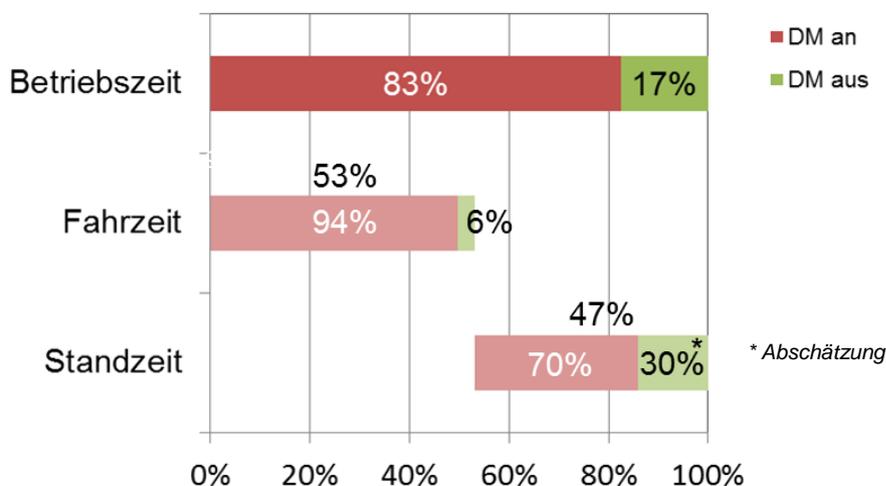
- Einsatz: MAN EU VI Dauerlauf
- Zeitraum: seit Q3/2014
- Streckenanteil rein el. Fahren: 22%
- Zeitanteile Motorstopp:



Das Hybridsystem und die Betriebsstrategie des Lion's City Hybrid sind in erster Linie auf Kraftstoffeinsparung und nicht auf langes „rein elektrisches Fahren“ ausgelegt. Trotzdem können mit dem Lion's City Hybrid EEV hohe Motorstopp-Zeitanteile beim Kunden nachgewiesen werden. Mit dem Lion's City Hybrid EU VI können diese Werte sogar noch verbessert werden.

**Abbildung 33: Anteil rein elektrisches Fahren MAN Solo Seriell-Hybrid**

Weiterhin liegen von Volvo Daten für 7 Solobusse mit Parallel-Hybridantrieb der Verkehrsbetriebe Hamburg-Holstein AG für einen Zeitraum von 14 Monaten<sup>2</sup> vor. Die Busse haben einen parallelen Hybridantrieb mit einer Lithiumionenbatterie (LiFePo<sub>4</sub>), die über einen Energieinhalt von 4,8 kWh verfügt. Die rein elektrisch zurückgelegte Strecke liegt etwas unter 2%. Hier wirkt sich einerseits die antriebskonzeptbedingte Begrenzung des rein elektrischen Fahrens bis Geschwindigkeiten von max. 20 km/h sowie andererseits die tendenziell enge Fahrplangestaltung des Betreibers aus, bei der die Abfahrvorgänge mehrheitlich unter Volllast geschehen. Der zeitliche Anteil (siehe Abbildung 34) bei dem der Dieselmotor aus ist, liegt für die gesamte Betriebszeit bei 17%. Der 30% Anteil Dieselmotor aus im Stand ist eine konservative Abschätzung und leitet sich aus den Untersuchungen des TÜV NORD ab (siehe nächster Abschnitt).



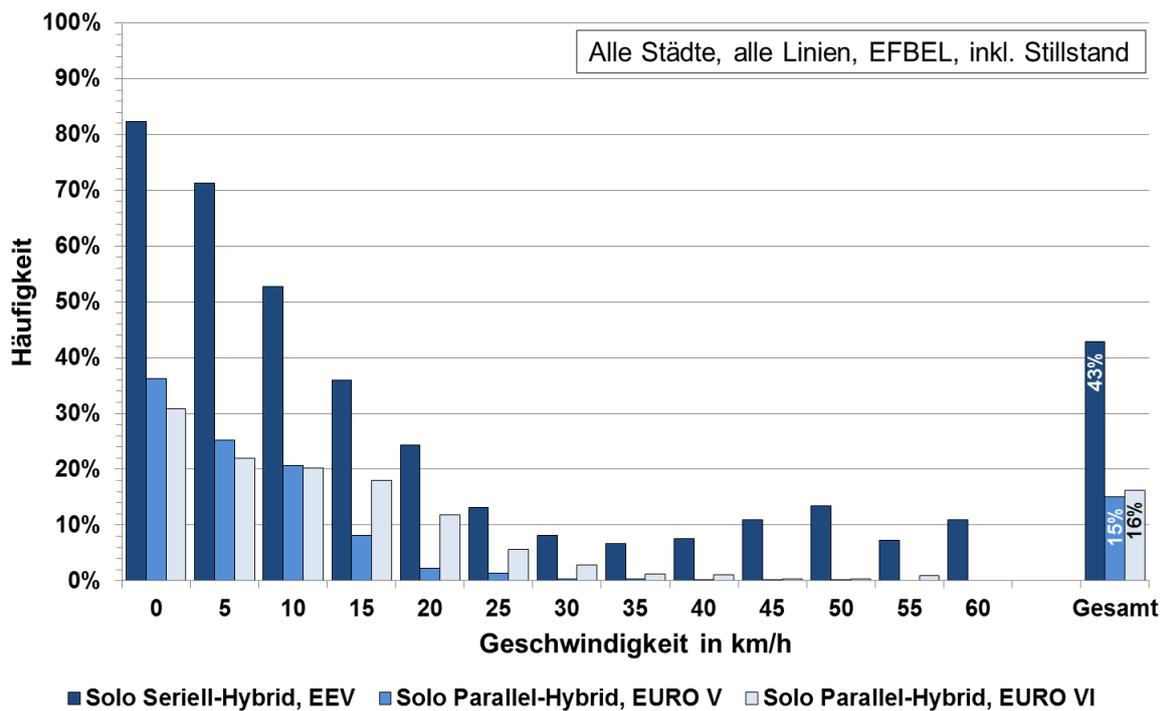
**Abbildung 34: Anteil rein elektrisches Fahren bei VHH in Hamburg –Solo Parallel-Hybrid**

Wie bereits erwähnt, weist ein Parallel-Hybridantrieb, bei dem prinzipbedingt ein Teil der Antriebsenergie mechanisch direkt vom Dieselmotor erzeugt wird, gegenüber einem seriellen Hybridantrieb, bei dem die Antriebsenergie ausschließlich elektrisch übertragen wird, einen höheren strecken- und zeitbezogenen Anteil auf, während dem der Dieselmotor an ist. Insofern zeigen die Ergebnisse sogar einen tendenziell höheren Anteil rein elektrischen Betriebs für den Parallel-Hybrid auf als zu erwarten war. Ähnlich wie bei MAN zeichnet sich auf Basis zur Verfügung gestellter Daten für ein aktuelles Euro VI Fahrzeug (7900 Hybrid) eine weitere Steigerung des Anteils rein elektrischen Fahrens ab<sup>3</sup>.

Die von den Herstellern zur Verfügung gestellten Daten konnten durch Messungen des TÜV NORD bestätigt werden. Die im Rahmen des vom BMVI geförderten EFBEL Projektes durchgeführten Messuntersuchungen im Rhein-Ruhrgebiet zeigen ähnliche Werte, so liegt für den seriellen Solohybridbus der zeitliche Anteil des rein elektrischen Fahrens über die vermessenen Strecken bei 43% und für den parallelen Solohybrid ergeben sich 15% bzw. 16%. Beim Seriell-Hybrid Bus handelt es sich um ein EEV Fahrzeug von MAN und beim Parallel-Hybrid Bus um einen Volvo 7700 Euro V und einen Volvo 7900 Euro VI.

<sup>2</sup> (März.-November 2014, April-September 2015)

<sup>3</sup> Die für ein Fahrzeug bereitgestellten Daten (gleicher Zeitraum) bei einem anderen Verkehrsunternehmen mit einer "großzügigeren" Fahrplanauslegung weist einen zeitlichen Anteil des rein elektrischen Fahrens von 41% auf. Der streckenbezogenen Anteil liegt bei 6%.



**Abbildung 35: Zeitanteil rein elektrisches Fahren Hybridbusse, EFBEL Projekt**

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

Das Thema des rein elektrischen Fahrens war für alle Verkehrsunternehmen mit Ausnahme der üstra interessant und beeinflusste zumindest die Systementscheidung für ein Verkehrssystem mit Hybridbussen. Die Hersteller bestätigen entsprechenden Informationsbedarf der Kunden vor und während der Beschaffung. Verbindliches Vergabekriterium im Sinne einer Lastenheftanforderung war der rein elektrische Fahrbetrieb jedoch nur in einem Fall.

Aus den eingegangenen Fahrerantworten zu den Solohybridbussen (siehe Anhang G 1) geht hervor, dass die Fahrer rein elektrisches Fahren in den abgefragten Situationen in vielen Fällen beobachteten.

Als Situationen, in denen elektrisches Fahren häufig auftritt, gaben die Fahrer insbesondere das Abfahren von Haltestellen und von Lichtsignalanlagen (nach vorherigem Halt) an.

Fahrzeugtypabhängig wurde rein elektrisches Fahren bei Langsamfahrt ebenfalls häufig beobachtet. Dabei wurde für die Fahrgeschwindigkeit, bei der das Umschalten zwischen rein elektrischem und Dieselbetrieb erfolgt, ein Wertebereich von 10 bis 30 km/h angegeben.

## 5.2.6 Anforderungen an Fahrer / Fahrerschulung (IVI)

Neue Technologien setzen sich immer nur bei entsprechender Schulung und Akzeptanz für bzw. durch die Nutzer durch. Hinzu kommt bei Hybridbussen, dass nennenswerte Einsparungen von Kraftstoff nur bei entsprechender Fahrweise, bei der insbesondere das rekuperative Bremsen eingesetzt wird, zu erzielen sind.

Für die anzustrebende Fahrweise werden durch die Hersteller Vorgaben gemacht. Diese werden in speziellen Schulungen für Hybridbusfahrer, entsprechenden Unterlagen (Handbüchern), durch Visualisierung während des Fahrens bzw. durch die Belegung der Aktoren (Fahrpedal/Bremse) vermittelt.

An die Hersteller wurden Fragebögen zu den ihrerseits notwendigen Anforderungen an die Fahrer und den daraus resultierenden Schulungskonzepten gesendet. Aus den vorliegenden Antworten, den allgemeinen Veröffentlichungen zu Schulungsangeboten und den Fahrzeughandbüchern resultieren die nachfolgend beschriebenen Anforderungen an die Schulung der Fahrer und deren Arbeit im Linienbetrieb.

### 5.2.6.1 MAN

MAN bietet für die Weiterbildung der Fahrer sowohl die nach dem Berufskraftfahrer-Qualifikationsgesetz (BKrFQG) notwendigen Module als auch spezielle Seminare für den Umgang, den Betrieb und die Wartung und Instandhaltung von Hybridbussen an. Die Seminarangebote beschäftigen sich neben dem Seminar BF01a, welches allgemeine Kenntnisse zu Linienbussen vermittelt, mit dem sachgerechten Umgang mit dem Hochvoltsystem (s. Tabelle 15). Während des Linienbetriebes wird eine energiesparende Fahrweise (sowohl beim Beschleunigen als auch beim Bremsen) augenfällig durch den grünen Bereich des Anzeigeelementes (Hybrid Economy Display) signalisiert. Die Funktion des Instrumentes ist selbsterklärend und wird zusätzlich im Handbuch erläutert. Außerdem bietet MAN eine spezielle Schulung für Hybridbusfahrer an, bei der auch in der Praxis energiesparendes Fahren trainiert wird.

Im Handbuch für den MAN-Hybridbus<sup>4</sup> werden im Kapitel „Wirtschaftliche Fahrweise“ den Lernenden zunächst die wesentlichen Einflussgrößen für Kraftstoffeffizienz (Topographie, Energieverbrauch der Nebenaggregate, Passagierbelegung, Verkehrsfluss/-führung, Fahrweise und Fahrerfahrung, Witterung bzw. Jahreszeit, Wartungszustand des Fahrzeuges, Geschwindigkeit, Zustand und Luftdruck der Bereifung) dargestellt. Anschließend werden die Einfluss- und Kontrollmöglichkeiten des Fahrers erläutert. Dabei wird auf die unterschiedliche Stellung des Bremspedals für rekuperatives und mechanisches Bremsen, die oben beschriebene Effizienzanzeige und die weiteren Anzeigemöglichkeiten des Fahrerdisplays zu Energiefluss und Speicherzustand eingegangen.

Als besonders wesentlich für einen energieeffizienten Linieneinsatz betrachtet MAN

- das Verständnis der Funktionsweise des Antriebsstranges,
- das Verständnis der Funktionsweise der Bedienelemente, insbesondere des Hybrid Economy Displays,
- die optimale Ausnutzung von Bremszyklen/Bremsdauern zur Maximierung der Rekuperation und

---

<sup>4</sup> MAN: Handbuch Hybrid -Technologie

- eine vorausschauende Fahrweise, um unnötige kraftstoffverbrauchssteigernde Beschleunigungen/Kickdowns etc. zu vermeiden.

**Tabelle 15: Seminarangebot MAN ProfiDrive® 2014**

Bezeichnung	Dauer [Tage]	Zielgruppe	Inhalt
Hybrid Einweisung	2	Fahrer	Tag 1: Einweisung in die Fahrzeugtechnik, Tag 2: praktische Umsetzung und Erlernen einer hybridoptimierten Fahrweise
BF01a Linienbus	2	k. A.	Bedienung und Aufbau der Linienbusse, Anwendung der Service-Literatur, Grundlagen Wartung
BHW-01 Sicherheitsunterweisung für das Hochvolt-System am MAN-Hybridbus	k. A.	Werkstatt	Sicherer Umgang mit dem MAN-Hybridbus in der Werkstatt nach BGI 8686, Stufe 1
BH01a Hochvolt-Fachkraft am MAN-Hybridbus	4	Werkstatt	Ausbildung zur Hochvolt-Fachkraft nach BGI 8686, Stufe 2b
BH01b Diagnose Hochvolt-System am MAN-Hybridbus	4	Werkstatt	Diagnose und Instandsetzung der Hochvolt-Anlage am MAN-Hybridbus
BH01c Hochvolt-Fachkraft mit AuS-Berechtigung am MAN-Hybridbus	1,5	Werkstatt	Weiterbildung zur Hochvolt-Fachkraft mit AuS-Berechtigung (Arbeiten unter Spannung) nach BGI 8686, Stufe 3a/b

#### 5.2.6.2 Volvo

Als besonders wesentlich für einen energieeffizienten Linieneinsatz werden von Volvo Kenntnisse über

- die Funktion der Rekuperation von Bremsenergie und
- den Zusammenhang zwischen Leistung, Geschwindigkeit und Verbrauch

betrachtet. Das Schulungsangebot für Hybridbusse zeigt Tabelle 16

**Tabelle 16: Seminarangebot für Volvo-Hybridbusse**

Bezeichnung	Dauer [Tage]	Zielgruppe	Inhalte
Eco-Training	1	Fahrer	- Nutzung von Kinematik, - Fahrzeugtechnik - angepasste Fahrweise für Hybridbusse
Starkstrom	2	Werkstattmeister	- Arbeiten mit 600 V Spannung; - Fahrzeug aktivieren und deaktivieren - Reparaturfreigabe
Hybridtechnik	1	Monteure	Reparatur- und Wartungsarbeiten am stromlosen Fahrzeug

### 5.2.6.3 Solaris

Als wesentliche Grundlage für das Führen der Hybridbusse werden entsprechend Tabelle 17 von Solaris Kenntnisse über

- die Funktionsweise von Hybridbussen im Allgemeinen,
- den richtigen Umgang mit dem Bus und die Bedienung des Fahrerarbeitsplatzes,
- die richtige Fahrweise im Stadtverkehr und
- die Sicherheitsregelungen sowie das Verhalten in Notfallsituationen

betrachtet. Dazu bietet Solaris für Fahrer zwei aufeinander aufbauende Schulungen von jeweils einem Tag Dauer an. Das Seminar für die Ausbildungsfahrer (Multiplikatoren) behandelt die gleichen Inhalte wie der Aufbaukurs für Fahrer, jedoch lässt es durch die Begrenzung auf maximal 5 Teilnehmer die Möglichkeit zu einer intensiveren Ausbildung. Den Teilnehmern werden die Bedienungsanleitung des Hybridbusses und eine Broschüre über die Grundsätze für sicheres und effizientes Fahren in Papierform (auf Kundenwunsch auch in elektrischer Form) übergeben.

**Tabelle 17: Seminarangebot für Solaris-Hybridbusse**

Bezeichnung	Dauer [Tage]	Zielgruppe	Inhalte
H.02.01	1	Fahrer (max. 15 Personen)	- Bau des Hybridbusses - Funktionsprinzipien des Hybridantriebs
H.02.03	1	Fahrer (max. 8 Personen)	- Bedienung des Fahrerarbeitsplatzes - Regeln der Fahrsicherheit - Regeln energieeffizientes Fahren - Verhalten in Notfallsituationen/ Sicherheitsregeln
H.02.04 Train the Trainer	1	Trainer (max. 5 Personen)	- Bedienung des Fahrerarbeitsplatzes - Regeln der Fahrsicherheit - Regeln energieeffizientes Fahren - Verhalten in Notfallsituationen/ Sicherheitsregeln

### 5.2.7 Akzeptanz beim Personal (IVI)

Die Akzeptanz der Hybridbustechnologien beim Personal wurde durch schriftliche Befragungen des Fahrpersonals und mündliche Befragungen der Werkstatlleiter ermittelt.

#### 5.2.7.1 Befragung der Fahrerinnen und Fahrer

Zur Bewertung der Hybridbusse erhielten die Fahrer und Fahrerinnen Fragebögen, die schriftlich auszufüllen und anonym zurückzusenden waren. Falls Verkehrsunternehmen sowohl Solo- als auch Gelenkhybridbusse einsetzten, wurden fahrzeugspezifische Fragen für beide Fahrzeuggrößen getrennt gestellt. Bei gleichem Hersteller und gleicher Hybridtechnologie wurden die Solo- und Gelenkbusse in den Rückantworten meist gleich bewertet. Insgesamt sendeten 143 Fahrer und Fahrerinnen ihre Antworten ein. Die ausführliche Auswertung der Antworten befindet sich im Anhang G 1.

Aus den Rücksendungen geht hervor, dass die Fahrer die Ziele der Hybridtechnik befürworten. Das zeigen insbesondere die Hinweise zur Weiterentwicklung der Technologie. Hier zählen längeres rein elektrisches Fahren, durchgängig elektrischer Betrieb während der Haltestellenaufenthalte sowie eine noch effizientere Kraftstoffnutzung zu den Wünschen.

Beim Beschleunigungsverhalten meldeten die Fahrer Verbesserungsbedarf an. Kräftigeres Beschleunigen (besonders im elektrischen Modus) und Wegfall der Unterbrechungen, die beim Zuschalten des Dieselmotors und beim Schalten der Parallelhybridfahrzeuge auftreten, wurden sehr häufig genannt. Gleichzeitig wurde das Beschleunigen im elektrischen Betrieb oftmals als gleichmäßiger, angenehmer und fahrgastfreundlicher empfunden.

Als Unterschied im Bremsverhalten wurde angegeben, dass bis auf einen Fahrzeugtyp die Hybridbusse gefühlvoller und besser dosiert gebremst werden können als Dieselmotoren. Die anderen Fahreigenschaften wurden ähnlich wie bei konventionellen Dieselmotoren bewertet, nur der Anfahrvorgang häufig als langsamer und länger dauernd beschrieben.

Die beim Zuschalten des Dieselmotors und beim Schalten der Parallelhybridfahrzeuge auftretenden Geräusche und Vibrationen wurden kritisiert. Die Grundgeräusche der Fahrzeuge wurden jedoch oft als leiser empfunden, besonders beim Hybrid Solo 1 und beim Hybrid Gelenk 1.

Die Umstellung auf das Fahren der Hybridbusse verursachte den Fahrern meist keine Probleme, obwohl Unterschiede gegenüber der Bedienung von konventionellen Dieselmotoren ausgemacht wurden. Diese bestanden u.a. in der Nutzung des Gaspedals zum rekuperierenden Bremsen. Wie zu erwarten, gaben Fahrer, die nur eine kurze Unterweisung zu den Fahrzeugen erhalten hatten, eher Schwierigkeiten beim Umstieg auf die Hybridbusse an, als solche deren Ausbildung ausführlicher war.

Eine stärkere Heizung für sowohl für Fahrer als auch Fahrgäste wurde für alle Fahrzeuge angeregt.

Die Hinweise zur Gestaltung des Fahrerarbeitsplatzes waren zahlreich. Sie betrafen u. a. die Größe, Anzahl und Sicherheit der Ablagen, die Einstellbarkeit des Platzes, Sichtbarkeit und Erreichbarkeit der Anzeigen und Bedienelemente, den Blendschutz und Ähnliches. Hinsichtlich der Signalisierung von Energieeffizienz und Speicherzustand war die Bewertung herstellerabhängig. Sofern Fahrplan und Anzeige eine Ausrichtung des Fahrstils auf diese Eigenschaften zuließen, wurde dies von den Fahrern häufig umgesetzt.

Zusammenfassend können aus den Einschätzungen des Fahrpersonals folgende Aufgaben für die Verbesserung der Hybridbusse abgeleitet werden:

- weitere Verbesserung des Beschleunigungsverhaltens,
- Beseitigung der Leistungsunterbrechungen beim Zuschalten des Dieselmotors und beim Schalten einschließlich der dabei auftretenden Vibrationen,
- Gestaltung des Fahrerarbeitsplatzes entsprechend VDV-Empfehlung und zusätzlich eine einheitliche und eindeutige Signalisierung von Energieeffizienz und Speicherzustand zum aktuellen Zeitpunkt,
- Anpassung der Schallquellen (z. B. Lüfter) an die leisere Umgebung,
- Auslegung der Heizung an die meist geringeren Wärmeemissionen des Motors anpassen.

Für die Weiterentwicklung der Fahrzeuge ergeben sich die bereits oben genannten Ziele:

- längeres rein elektrisches Fahren,
- durchgängig elektrischer Betrieb während der Haltestellenaufenthalte sowie
- eine noch effizientere Kraftstoffnutzung.

#### 5.2.7.2 Befragung der Werkstattleiter

Die Befragung der Werkstattleiter erfolgte zweistufig. Zunächst wurde für die Werkstattleiter ein Fragebogen erarbeitet, der im März 2015 versendet wurde. Auf der Grundlage der Rückantworten sowie weiterer Erhebungsergebnisse (SoFi-Erfassung, Befragung rein elektrischer Fahrbetrieb) wurden zum ursprünglich geplanten Ende des Prüfprogramms Ende April alle Werkstattleiter nochmals zusammenfassend telefonisch befragt. Auswertungen beider Erhebungsaktionen befinden sich im 0.

Die nachfolgende Auswertung der Werkstattleiterbefragung erfolgt etwas ausführlicher, da die schriftlichen und mündlichen Statements der technisch Verantwortlichen in den Verkehrsunternehmen wichtige und wertvolle Impulse geben und in der Regel eine gute Zusammenfassung der betrieblichen Erfahrungen mit den verschiedenen Herstellern und Fahrzeugtypen darstellen.

##### *Hamburger Hochbahn AG (HHA), Hamburg*

Die HHA betreut zwar schon seit etwa fünf Jahren Hybrid- und Wasserstoffbusse, die Einsatzerfahrungen mit den im Rahmen dieses Prüfprogramms erfassten Fahrzeugen (Volvo 7900 H als Solo- und Gelenkfahrzeuge) umfassen aber erst wenige (ca.4-5) Monate, weswegen man sich noch nicht zu allen Punkten voll aussagefähig sah.

Die Wartung und Instandhaltung der Hamburger Hybridbusse (einschließlich der HHA-Tochterunternehmen Jasper und SBG) erfolgt bei der Hochbahn-Tochter FFG Fahrzeugwerkstätten Falkenried GmbH. Dort werden sämtliche Arbeiten bis hin zu Tätigkeiten am Hybridsystem in Eigenleistung erbracht. Es besteht ein Regiewerkstattvertrag mit Volvo, so dass auch Gewährleistungssachen vor Ort bearbeitet werden können. Mitarbeiter der FFG wurden in einer fünftägigen Schulung zu zertifizierten Hybridbustechnikern qualifiziert.

In den ersten Betriebsmonaten wurden höhere Ausfallhäufigkeiten bei den Hybridbussen verzeichnet. Auffällig waren häufige Störungen der Türantriebe und Defekte der Blinkerhebel. Mit dem Herstellersupport ist man zufrieden, lediglich die Qualität der Versorgung mit Ersatzteilen variiert.

Die Beschaffung weiterer Hybridbusse würde in jedem Fall befürwortet.

Die mittlere Verfügbarkeit der Busse beträgt nach mittlerweile 9 Monaten Betrieb per Oktober 2015 ca. 89,5% bzw. 87,6% für die Volvo Solo- bzw. Gelenk-Hybridbusse.

##### *Jasper Rund-u. Gesellschaftsfahrten GmbH (Jasper), Hamburg*

Bei Jasper wurden zunächst auch die 7 außerhalb der aktuellen BMUB-Förderung beschafften Hybridbusse der Vorgänger-Baureihe (Volvo 7700 H) in die Evaluation mit aufgenommen. Allerdings wurden diese Fahrzeuge nach Auslaufen der Leasing-Vereinbarung zum März 2015 an den Hersteller zurückgegeben. Gründe waren eine zu hohe Defektanfälligkeit sowie Probleme mit Vibrationen im Fahrzeug. Die Verfügbarkeit der Volvo 7700 H-Flotte betrug in der Datenerfassung durchschnittlich 88,5 %.

Jasper führt im Bereich Wartung und Instandhaltung nur kleinere, alltägliche Arbeiten durch, alle größeren Defekte und Schäden werden auf Basis einer Rahmenvereinbarung zur FFG überstellt. Entsprechend beschränken sich die Tätigkeiten am Hybridsystem auf das Freischalten des Fahrzeugs. Neben der grundlegenden Qualifizierung zum Fachkundigen für HV-eigensichere Volvo-Bus-Fahrzeuge erfolgten Schulungen zu weiteren herstellerbezogenen Spezifika (Klimaanlagentechnik, Türsteuerung), da bislang nur Fahrzeuge des Herstellers EvoBus betrieben wurden.

Das Feedback der Mitarbeiter aus dem Werkstattbereich bezog sich weniger auf hybrid- als auf herstellerspezifische Besonderheiten aufgrund des erstmaligen Einsatzes von Volvo-Bussen (z. B. grundlegend andere Stromlaufpläne).

Bei den aktuellen Bussen vom Typ Volvo 7900 H sei die Ausfallhäufigkeit etwa gleich mit der anderer Busse, die Standzeiten allerdings mitunter länger. Bei kleineren Wartungsarbeiten wirkt sich hier der jeweils erforderliche Freischaltvorgang aus, bei Gewährleistungsfällen gab es längere Wartezeiten auf Ersatzteile (im Einzelfall bis zu zwei Monate) sowie langwierige Rücksprachen mit der Konzernzentrale vor Beginn der Bearbeitung.

In der Anfangsphase des Einsatzes wurde eine erhöhte Fahrzeugreserve vorgehalten und teilweise auch beansprucht, insbesondere wegen Türproblemen. Inzwischen läuft die neue Fahrzeuggeneration aber in einer mit der übrigen konventionellen Flotte vergleichbaren Zuverlässigkeit (lt. Datenerfassung durchschnittlich 91,8 %).

#### *SBG Süderelbe Bus GmbH, Hamburg*

Auch bei der SBG wurden Hybridbusse vom Typ Volvo 7700H (erste Generation) mit in die Erfassung aufgenommen. Von einer Rückgabeabsicht ist hier aber nichts bekannt.

Die Angaben in der schriftlichen Befragung decken sich über weite Teile mit denen des Unternehmens Jasper, was vor dem Hintergrund der praktisch identischen Konstellation (Rahmenvertrag FFG) nicht weiter verwunderlich ist.

Interessanterweise werden allerdings bei der SBG die neuen Hybridbusse vom Typ Volvo 7900 H als störanfälliger bewertet.

In der etwas später erfolgten Befragung fällt das zusammenfassende Votum jedoch positiv für die Hybridbusse aus. Im täglichen Betrieb gebe es keine merklichen Unterschiede zwischen Hybrid- und konventionellen Dieselnissen. Aus Sicht der Instandhaltung ist das Handling etwas arbeits- und zeitaufwendiger wegen der höheren Komponentenzahl.

Das Feedback der Werkstattmitarbeiter ist gut, die Hybridbusse werden mit der neuen Technologie als positive Herausforderung gesehen („Mal was Anderes“).

Es wird von vereinzelt längeren Ausfällen in der Anfangszeit berichtet, jedoch seien diese Ausfälle nie hybridbedingt gewesen. Die seltenen hybridspezifischen Ausfälle konnten immer in kurzer Zeit bearbeitet werden. Auch bei SBG wurde anfangs eine etwas höhere Fahrzeugreserve vorgehalten, diese wurde aber nicht benötigt.

Die Werkstattleitung der SBG würde eine weitere Beschaffung von Hybridbussen unterstützen, nicht zuletzt vor dem Hintergrund einer durchschnittlichen Verfügbarkeit von 95,8% für den Zeitraum September 2013 bis September 2015.

#### *Stadtbus Ingolstadt GmbH (SBI), Ingolstadt*

Die Stadtbus Ingolstadt hat für ihre drei MAN Lion's City Hybrid einen Full-Service-Vertrag mit dem Hersteller abgeschlossen, der einen Zeitraum von fünf Jahren umfasst. Dieser Zeitraum entspricht der verlängerten Garantie auf den Hybridantrieb (für den übrigen Fahrzeugteil gilt die übliche Gewährleistung von zwei Jahren). Bis auf die täglichen Wartungsarbeiten werden entsprechend keine Defekte und Schäden in Eigenleistung behoben. Vom Hersteller wurden Werkstattmitarbeiter zur Hochvolt-Fachkraft am MAN-Hybridbus qualifiziert. Wie nach Ablauf des Servicevertrages mit der Wartung und Instandhaltung, insbesondere für den Hybridstrang, verfahren werden soll, ist noch nicht entschieden.

Nach Behebung der längeren Ausfälle wegen der Summiergetriebe zu Beginn des Einsatzes (außerhalb der SoFi-Erfassung, vgl. Kapitel 5.2.1) zeigt man sich positiv von der Verfügbarkeit der Hybridbusse überrascht (durchschnittliche Verfügbarkeit von April 2014 bis September 2015 93,3%). Sie werden mittlerweile wie konventionelle Busse eingesetzt. Ausfälle sind in der Regel nicht dem Hybridantrieb zuzuordnen, sondern betreffen den konventionellen Busteil. Beispielhaft hervorgehoben wurden auch hier Türprobleme.

Auch bei der SBI wurde in der Anfangszeit eine höhere Fahrzeugreserve vorgehalten. Dies werde dort jedoch grundsätzlich bei der Einführung neuer Technologien so gehandhabt. Aufgrund der bayerischen Landesförderung laufen Neufahrzeuge in der Regel zum Jahresende zu, so dass man die auszusondernden Fahrzeuge über den folgenden Winter noch im Bestand belässt.

Trotz erzielter Kraftstoffeinsparungen enttäuscht jedoch die Kosten-Nutzen-Betrachtung. Daher wird aus wirtschaftlichen Gründen unter den aktuell gegebenen Preis- und Förderszenarien eine weitere Beschaffung von Hybridbussen nicht angestrebt. Bei fallenden Kosten könne man sich aber eine Beschaffung in höherer Stückzahl vorstellen.

#### *üstra Hannoversche Verkehrsbetriebe AG, Hannover*

Das Feedback der üstra ist zweigeteilt und stark fahrzeugtypenabhängig. Mit den eingesetzten Gelenk-Hybridbussen vom Typ Solaris Urbino H18 ist man sehr zufrieden, für die Solo-Hybridbusse vom Typ Urbino H12 trifft dies nicht zu.

In der schriftlichen Befragung fällt auf, dass die Antworten zu den häufigsten Störungsquellen, den am häufigsten angeforderten Ersatzteilen und Optimierungen des Herstellers nach der Auslieferung ausschließlich Komponenten des Traktionsausrüsters für die 12-m-Fahrzeuge verbaut sind, betreffen (in den 18 m Fahrzeugen ist ein Hybridantrieb eines anderen Herstellers eingebaut).

Der Vergleich mit den Verfügbarkeitsdaten zeigt allerdings sogar eine deutlich höhere Verfügbarkeit der Solo-Hybridbusse (91,4 % gegenüber 87,1 %). Klammert man jedoch das Fahrzeug 8312 aus, das fast zwei Monate durchgehend außer Betrieb war, so kommen die Gelenk-Hybridbusse auf eine etwas höhere Verfügbarkeit von 90,9 %.

Die üstra führt sämtliche Wartungs- und Instandhaltungsarbeiten in Eigenleistung durch und verfügt über entsprechend qualifiziertes Personal. Die Qualifizierung wurde in mehreren Stufen ausgebaut. Es besteht ein Servicewerkstattvertrag mit Solaris mit einer Laufzeit von zehn Jahren.

Unterstützt werden die Werkstattmitarbeiter von den bei Solaris „Flying Doctors“ genannten Kundendienstmonteuren des Herstellers. Die Zufriedenheit mit dem Kundendienst ist allerdings mäßig. Nähere Details waren aufgrund vertraglicher Regelungen nicht verfügbar.

Die Vorhaltung einer erhöhten Fahrzeugreserve für die Hybridbusse wird verneint, dies sei wirtschaftlich auch nicht darstellbar.

Die abschließende Bewertung fällt entsprechend wieder gemischt aus. Aus technischer Sicht können die Gelenk-Hybridbusse von Solaris durchaus weiterempfohlen werden. Für die anstehende Neubeschaffung von Solo-Hybridbussen wird man Alternativen prüfen. Aus der rein wirtschaftlichen Perspektive lässt sich der weitere Einsatz von Hybridbussen vor dem Hintergrund der erzielten Kraftstoffeinsparungen allein nicht rechtfertigen.

#### *Verkehrsbetriebe Hamburg-Holstein GmbH (VHH), Hamburg*

Auch die VHH setzt Solo-Hybridbusse des Herstellers Volvo ein (Typ 7900 H). Sie gehört allerdings nicht zum Unternehmensverbund der HHA und verfügt demnach auch über keine Rahmenvereinbarung mit der FFG.

Wartungs- und Instandhaltungsarbeiten werden von der VHH selbst durchgeführt, sofern sie nicht das Hochvoltsystem betreffen. Für Gewährleistungsarbeiten wurde ein Regiewerkstattvertrag mit Volvo abgeschlossen. Die Qualifizierung des Werkstattpersonals beschränkt sich daher auf die grundlegende Weiterbildung zum Fachkundigen an HV-eigensicheren Volvo-Bus-Fahrzeugen. Für die Zeit nach Ablauf der Garantie- und Gewährleistungsfrist strebt man an, alle Wartungs- und Instandhaltungsaufgaben in Eigenleistung durchzuführen. Bei Schäden am Hybridsystem soll im Einzelfall eine Beurteilung von Schadensart und -umfang erfolgen und das Fahrzeug dann ggf. an die Volvo-Vertragswerkstatt überstellt werden.

Bei der VHH traten in besonderem Maße Probleme mit Fahrzeugvibrationen auf, die sogar zu körperlichen Beschwerden bei Fahrdienst-Mitarbeitern führten. Der erforderliche Umbau der Motorlagerung im Werk des Herstellers konnte diese Probleme auf ein erträgliches Maß reduzieren. Vermutlich waren bauliche Änderungen aufgrund der Ausführung der Fahrzeuge als Dreitürer ursächlich für die Problematik.

Abgesehen von diesem Aspekt zu Beginn des Einsatzes zeigt man sich bei der VHH aber grundsätzlich zufrieden mit den Hybridbussen, trotz etwas häufigerer Ausfälle der Fahrzeuge als bei konventionellen Bussen. Auch der Herstellersupport wird positiv bewertet. Die mittlere Verfügbarkeit der Hybridbusse liegt zum Ende der Datenerfassungsperiode bei 90,9%.

Bei den Werkstattmitarbeitern gab es eine gewisse Eingewöhnungszeit für die neue Technologie. Dies war auch dem Umstand geschuldet, dass die Qualifizierung erst nach Auslieferung des ersten Fahrzeugs stattfand, um erlerntes Wissen direkt in der Praxis umsetzen zu können.

Bei der VHH hat man sich bereits für die Beschaffung weiterer zehn Hybridbusse entschieden. Eine Rolle spielte dabei auch, dass gewisse Verarbeitungsmängel und enge Platzverhältnisse (z. B. Wartungsluken) bei den Bestandsfahrzeugen in der folgenden Fahrzeuggeneration behoben werden konnten.

#### *Wolfsburger Verkehrsgesellschaft mbH (WVG), Wolfsburg*

Die WVG ist der zweite Betreiber von Solo-Hybridbussen des Typs MAN Lion's City Hybrid. Auch in Wolfsburg wurde ein Full-Service-Vertrag über fünf Jahre mit dem Hersteller abgeschlossen. Entsprechend werden nur tägliche Wartungs- und Instandhaltungstätigkeiten selbst ausgeführt.

Für die Werkstattmitarbeiter erfolgte eine EDV-gestützte Hochvoltsensibilisierung, aus grundsätzlichen Erwägungen wurden jedoch vier Mitarbeiter zusätzlich für Hochvolt-Technik ausgebildet.

Mit der Einsatzstabilität der Hybridbusse ist man sehr zufrieden (mittlere Verfügbarkeit 91,4%). Die Fahrzeuge können mit der konventionellen Busflotte mindestens mithalten. Im Vergleich mit der Einführung anderer Innovationen (z. B. Euro V, Euro VI) ist die Verfügbarkeit der Hybridbusse in den Anfangsmonaten sogar besser. Die erzielten Kraftstoffeinsparungen entsprechen den Erwartungen. Mit dem Herstellersupport ist die WVG ebenfalls sehr zufrieden.

Aufgrund der positiven Erfahrungen mit den ersten drei Fahrzeugen wurde in Wolfsburg bereits die Entscheidung zur Beschaffung weiterer sechs Hybridbusse getroffen.

#### *Zusammenfassung*

Insgesamt ergibt die Befragung der Werkstatteleiter ein eher uneinheitliches Bild. Die Bandbreite reicht von tendenzieller Ablehnung weiterer Hybridbusse bis hin zu klaren Bekenntnissen zur Hybridtechnologie, wobei die Befürworter überwiegen. Teilweise wird der Einsatz von Hybridbussen technisch zwar befürwortet, jedoch aus wirtschaftlicher Sicht in Frage gestellt.

Prinzipiell bestätigen sich die Beobachtungen zur technischen Zuverlässigkeit (vgl. Kapitel 5.2.1) durch die Aussagen der Werkstattverantwortlichen. Es wird deutlich, dass mit Ausnahme der Urbino H12 von Solaris der Schwerpunkt bei den Ausfällen nicht im Hybridantrieb im engeren Sinne (E-Traktion, Energiespeichersystem) zu finden ist. Oft sind es klassische „Buskrankheiten“, die auch bei konventionellen Fahrzeugen auftreten. Herstellerübergreifend kommen hier immer wieder Türprobleme zur Sprache.

Bei der Zufriedenheit mit dem Support fällt auf, dass bei den meisten Betreibern die Beurteilung im Fragebogen retrospektiv etwas wohlwollender ausfällt als in der laufenden SoFi-Erfassung. Prinzipiell zeigen sich die Verkehrsunternehmen mit der After-Sales-Betreuung durch die Hersteller zufrieden. Teilweise werden jedoch lange Wartezeiten auf Ersatzteile oder eine zähe administrative Abwicklung von Gewährleistungsfällen bemängelt. Über die Ursachen für die niedrigen Zufriedenheitswerte der üstra mit dem Support des Herstellers Solaris konnte

die Befragung leider keine weiteren Erkenntnisse bringen. Hier wird für das laufende und möglicherweise nachfolgende Beschaffungsprogramme empfohlen darauf zu achten, dass keine Stillschweigevereinbarungen oder ähnliches geschlossen werden, um eine fundierte Begleitforschung zu ermöglichen. Im vorliegenden (Sonder)Fall der üstra ist dies nicht relevant, da die erfassten Fahrzeuge nicht Teil des Hybridbusbeschaffungsprogrammes des BMUB von 2013 waren und die üstra ansonsten die Begleitforschung sehr gut unterstützt hat, dennoch zeigt der Fall, dass es sich lohnt auf diesen Aspekt zu achten.

Bei der Personalqualifikation im Werkstattbereich zeigt sich konsequenterweise ein sehr bedarfsorientiertes Vorgehen: Je höher die Wertschöpfungstiefe in der eigenen Werkstatt, desto umfassender waren die Qualifizierungsmaßnahmen. Erfreulich ist die Tatsache, dass es aus den Reihen der Werkstattmitarbeiter keine ablehnenden Äußerungen gegenüber der neuen Technologie gab, sondern diese im Einzelfall sogar als Bereicherung des Alltagsgeschäfts angesehen wurde.

## 6 Ermittlung der Kosten im Linienbetrieb (AP1)

### 6.1 Zielsetzung und Vorgehensweise

Im Einklang mit der Leistungsbeschreibung werden in diesem Arbeitspaket die Kosten im Linienbetrieb für Hybridbusse und konventionelle Diesel-Referenzbusse ermittelt und gegenübergestellt. Dabei wird zunächst unterschieden zwischen

- fahrzeugbezogenen Kosten und
- systembedingten Zusatzkosten.

Ziel ist die Ermittlung der jeweiligen Mehr- oder Minderkosten der Hybridtechnologie im Vergleich zur Referenztechnologie (konventioneller Dieselantrieb).

Hierzu wurde im Rahmen des Förderprogramms "Hybridbusse für einen umweltfreundlichen ÖPNV" des damaligen Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) von uns im Jahr 2012 ein Kalkulationsmodell erarbeitet, mit welchem

- die anzunehmenden Instandhaltungskosten für Referenz- und Hybridbusse im Lebenszyklus mit
- typischem Aufwand für die Fahrzeugversorgung,
- im Praxisbetrieb ermittelten Kraftstoffverbräuchen,
- Kapitaldiensten und
- sonstigen fahrzeugbezogenen Kosten sowie
- systembedingten Zusatzkosten

zu einer typisierenden Gesamtdarstellung zusammengeführt werden.

### 6.2 Ergebnisse

#### 6.2.1 Fahrzeugbezogene Kosten von Hybridbussen im Vergleich zu konventionellen Dieselnbussen (BbA)

##### 6.2.1.1 Überblick

Einen Überblick über die fahrzeugbezogenen Kosten sowie deren wesentliche Einflussfaktoren gibt die nachfolgende Abbildung.

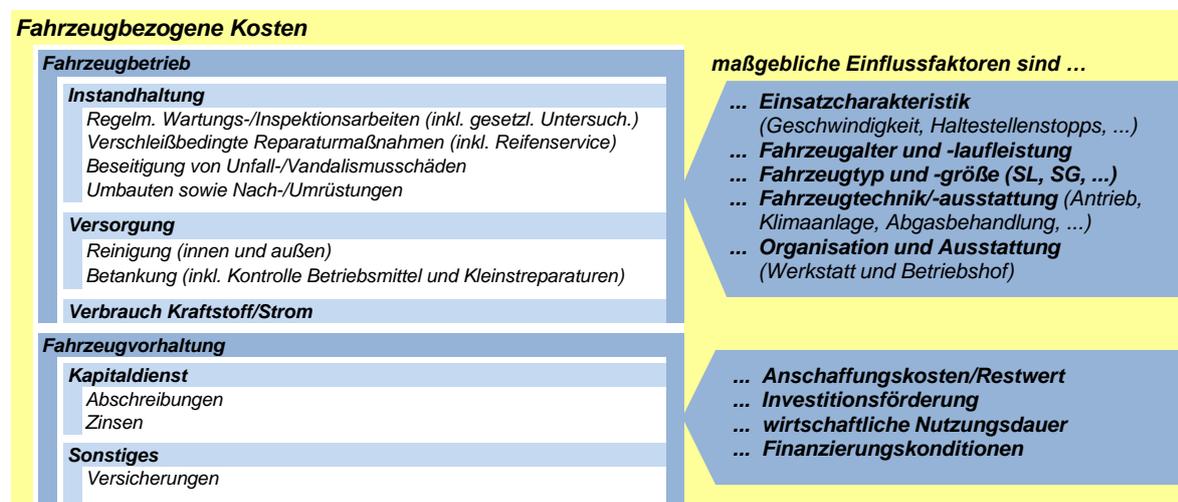


Abbildung 36: Fahrzeugbezogene Kosten

Die Berechnung und Gegenüberstellung der jeweiligen Kosten pro Kilometer erfolgt mittels des bereits oben erwähnten und fortgeschriebenen Kalkulationsmodells, welches im Rahmen des Förderprogramms "Hybridbusse für einen umweltfreundlichen ÖPNV" ausführlich dokumentiert wurde [TÜV NORD et al., 2012]. Im Folgenden werden daher nur die zentralen Grundlagen und Annahmen zusammenfassend kurz dargestellt.

#### A – Instandhaltung

- Die Instandhaltungskosten für die Diesel-Referenzbusse basieren auf der detaillierten Analyse einer aus 120 Fahrzeugen bestehenden „virtuellen Flotte“; diese repräsentiert je 5 Solo- und Gelenkbusse verschiedener Hersteller und Betreiber mit einer nahezu idealtypischen Altersverteilung für eine Nutzungsdauer von 12 Jahren mit einer durchschnittlichen Laufleistung von 60 Tkm p.a. je Fahrzeug.
- Zusätzlich werden die Instandhaltungskosten für moderne Abgasnachbehandlungssysteme im Lebenszyklus abgeschätzt.
- Die Lebenszykluskosten von Hybridfahrzeugen wurden ermittelt als Summe der Instandhaltungskosten moderner Diesel-Referenzbusse zzgl. einer Abschätzung des Mehraufwands für hybridspezifische Komponenten:
  - Für die Gesamtkosten kaum von Bedeutung sind Unterschiede im Bereich der regelmäßigen Wartungs- und Inspektionsarbeiten zwischen konventionellen Diesel- und Hybridbussen. Hier wurde ein durchschnittlicher hybridspezifischer Zusatzaufwand von 0,2 ct/km (Solobus) bzw. 0,5 ct/km (Gelenkbus) ermittelt.
  - Ein Teil des hybridspezifischen Mehraufwands resultiert aus dem voraussichtlich notwendigen Ersatz von Akkumulatoren in etwa der Mitte der angenommenen Nutzungsdauer von 12 Jahren. Sofern andere Energiespeicher (Supercaps) eingesetzt werden, die Energiespeicher gemietet werden („Batterieverträge“) oder ein Ersatz der Energiespeicher bereits im Kaufpreis enthalten ist, sind diese Kosten in den Kapitaldiensten (vgl. Kapitel 6.2.2.2 D) enthalten.
  - Auch für die übrigen hybridspezifischen Komponenten ist von einem gewissen Reparatur-/Ersatzbedarf auszugehen, wobei hier Erfahrungswerte über einen Lebenszyklus von 12 Jahren natürlich bislang nicht vorliegen. Insgesamt werden die Komponenten des elektrischen Antriebs aber als weitaus weniger instandhaltungsintensiv eingeschätzt als die konventionellen Komponenten insgesamt, die auch viele Verschleißteile (z.B. Bremsen) beinhalten. Auf dieser Basis wird für die Instandhaltung der hybridspezifischen Komponenten ein Ansatz von 10% der hybridspezifischen Anschaffungsmehrkosten (sogenannte kumulierte Instandhaltungsquote) angenommen, gegenüber ca. 100% bei den konventionellen Komponenten.
- Im Hinblick auf die Beseitigung von Unfall-/Vandalismusschäden sowie Umbauten und Modernisierungen wird davon ausgegangen, dass keine nennenswerten Kostenunterschiede bestehen.

## B – Fahrzeugversorgung

- Für die Kosten der Fahrzeugversorgung werden Erfahrungswerte angesetzt. Diese gehen von ca. 300 Versorgungsvorgängen p.a. und durchschnittlich 2 Außenwäschen pro Woche aus, wobei die Kosten der Waschanlage der Betriebshofinfrastruktur zugerechnet werden und hier nicht einfließen.
- Die Kosten der Innenreinigung werden mit jährlich 1.600 €/Solobus bzw. 2.200 €/Gelenkbus angesetzt.

## C – Verbrauch Kraftstoffe/Betriebsstoffe

- Für den Kraftstoffverbrauch werden die Daten aus der Betriebsdatenerfassung eingerechnet (vgl. Absatz 6.2.1.2).
- Die Bewertung der Verbrauchsdaten erfolgt mit einem Dieselpreis von 0,97 € pro Liter; dies entspricht dem Durchschnittspreis für gewerbliche Großverbraucher (exkl. Mehrwertsteuer, inkl. Ökosteuernerstattung) im Zeitraum der Datenerhebung von September 2013 bis September 2015 (vgl. Abbildung 70 in Kapitel 10.2.3.1).
- Die übrigen Betriebsstoffe (Öl, ggf. Ad-Blue etc.) sind von kostenmäßig untergeordneter Bedeutung; hier kommen die ermittelten Durchschnittswerte von insgesamt ca. 1 ct/km zum Ansatz.

## D – Kapitaleinstellung/Batteriemiete

- Für den Kapitaleinstellung wird eine lineare Abschreibung über 12 Jahre sowie eine Verzinsung des durchschnittlich gebundenen Kapitals (hälftiger Anschaffungswert) von 2,0% kalkuliert. Dabei werden die im Rahmen des Projekts von den Betreibern genannten durchschnittlichen Anschaffungskosten zugrunde gelegt.
- Der Restwert konventioneller Dieselbusse wird bei 12 Jahren Nutzungsdauer und 720.000 Km Laufleistung mit 8,5% angenommen. Bei Hybridfahrzeugen wird davon ausgegangen, dass diese bei gleicher Nutzungsdauer und gleicher Kilometerleistung keinen nennenswerten Restwert mehr haben.
- Bei den Hybridbussen werden in einigen Fällen die Batterien gemietet („Batterieverträge“); die von den Betreibern genannten Kosten werden nicht den Instandhaltungskosten zugeordnet, sondern fließen in die Kalkulation der Kapitaleinstellung mit ein.

## E – Sonstiges

- Für die Fahrzeugversicherung kommen einheitlich 4,2 ct/km (Solobus) bzw. 6,4 ct/km (Gelenkbus) zum Ansatz.

Das vorhandene Kalkulationsmodell wurde an die Erfordernisse des aktuellen Vorhabens angepasst, insbesondere im Hinblick auf AP 4 (Softwaretool zur Beschaffungsoptimierung). Für die hier erfassten 76 Hybrid- und 24 vergleichbaren Referenzbusse wurden Angaben zur Fahrzeugcharakteristik und Anschaffungskosten erhoben (vgl. Anhang A). Zudem wurden die wesentlichen Parameter des vorhandenen Kalkulationsmodells mit den Betreibern abgestimmt und in allen Teilbereichen auf das für die Projektlaufzeit relevante Preisniveau (2014) fortgeschrieben. Angaben zur Einsatzcharakteristik und die jeweiligen Kraftstoffverbräuche fließen

über die laufende Betriebsdatenerfassung (vgl. AP2) bzw. die Streckendatenerfassung (AP3) in die Betrachtung ein (vgl. Abbildung 30 in Kapitel 5.2.4).

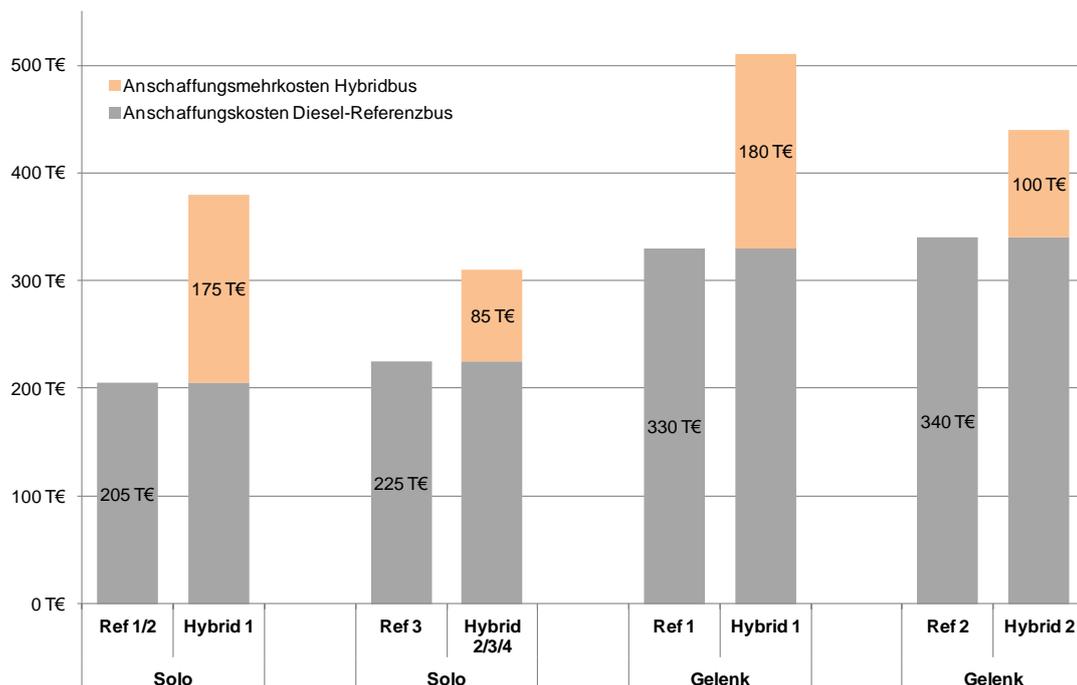
### 6.2.1.2 Ergebnisse

Hinsichtlich der Mehr-/Minderkosten von Hybridbussen ist nach heutigem Kenntnisstand davon auszugehen, dass gegenüber der Situation 2011/2012

- die Anschaffungsmehrkosten zum Teil erheblich zurückgegangen sind. Bei den meisten im aktuellen Prüfprogramm erfassten Solobussen betragen diese 85 T€ (zum Mittelwert der von den Betreibern ausgewählten Referenzfahrzeuge) und damit nur noch etwa halb so viel wie bei den preisgünstigsten Hybridsolobussen im Begleitprogramm 2012.

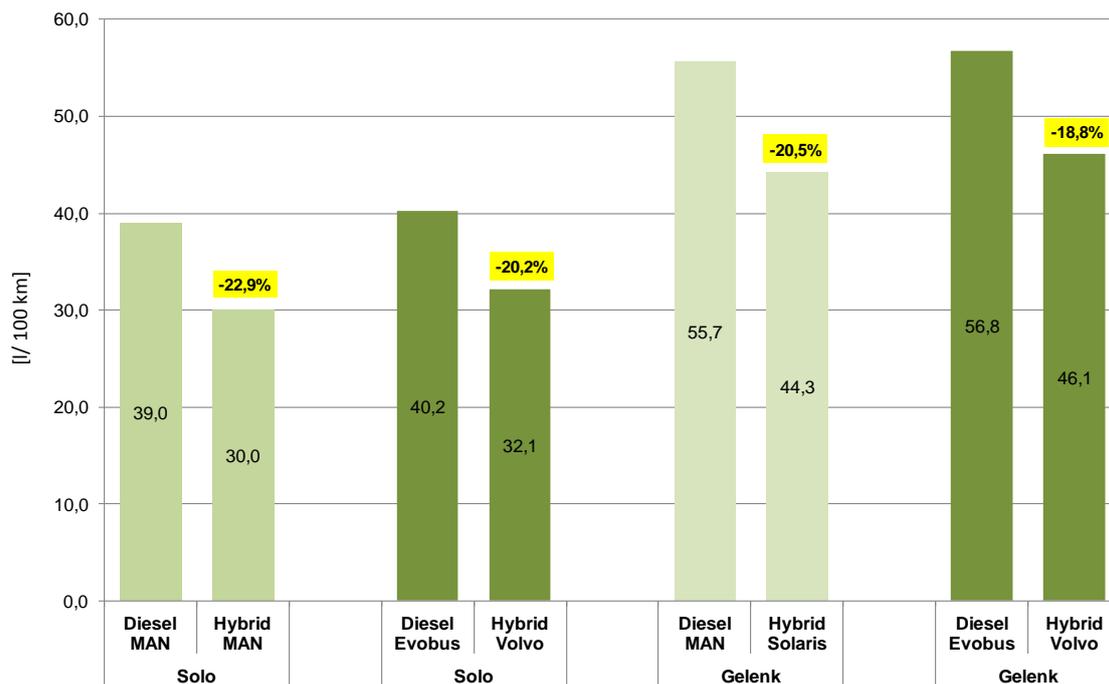
Die höchsten Anschaffungsmehrkosten bei den Solobussen liegen im konkreten Fall mit 175 T€ über den mittleren Mehrkosten in den Jahren 2011/2012. Dabei ist allerdings zu beachten, dass bei diesen Fahrzeugen wegen der Verwendung von Supercaps, für die eine Lebensdauer von 12 Jahren unterstellt wird, keine zusätzlichen Kosten für Batteriemiete oder Akkutausch anfallen.

Die Anschaffungsmehrkosten der Gelenkbusse zu den von den Betreibern ausgewählten Referenzfahrzeugen betragen 100 T€ bis 180 T€ (zum Vergleich 2011/2012: 200 T€).



**Abbildung 37: Anschaffungsmehrkosten im Vergleich**

- Die Verbrauchsdatenerfassung zeigt, dass mit der aktuellen Fahrzeuggeneration im Praxisbetrieb Verbrauchsreduzierungen von ca. 20% gegenüber den Referenzfahrzeugen realisiert werden; im Zeitraum 2011/2012 wurden Einsparungen in dieser Größenordnung auf dem Prüfstand nachgewiesen.



**Abbildung 38: Kraftstoffverbräuche im Vergleich**

- Die Kraftstoffeinsparungen verlieren allerdings durch die gegenüber der Situation 2011/12 um im Mittel 3% gesunkenen Kraftstoffkosten geringfügig an wirtschaftlichem Gewicht.
- Das von einem Hersteller angebotenen Modell des Batterievertrags sorgt für eine höhere Kalkulationssicherheit bei den Betreibern: Das Risiko des vorzeitigen Austauschs des Energiespeichers wird hier vom Hersteller übernommen, wobei die Mehrkosten im Rahmen eines 10-Jahresvertrags im Lebenszyklus gegenüber einem einmaligen Tausch des Akkus (zu heutigen Preisen ca. 35 T€) etwa 15 T€ betragen.

Hochgerechnet auf 12 Nutzungsjahre ergibt sich folgendes Bild:

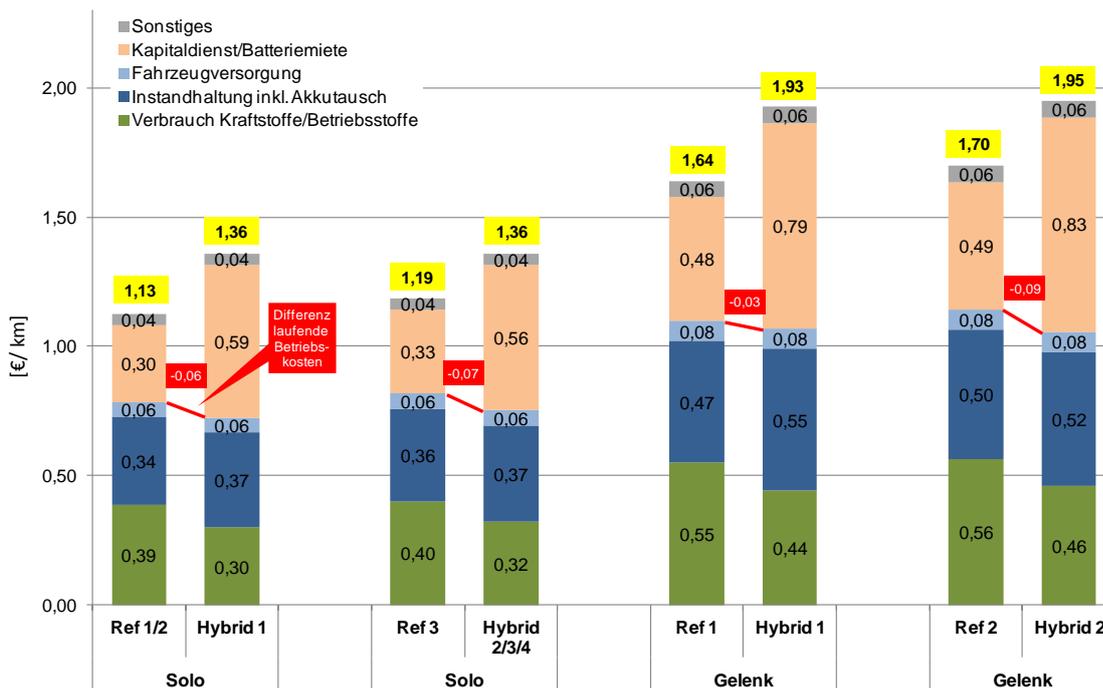


Abbildung 39: Fahrzeugbezogene Kosten im Vergleich

(normiert auf 60 Tkm p.a. & Nutzungsdauer 12 a)

Insgesamt ist festzustellen, dass sich die Mehrkosten der Hybridfahrzeuge gegenüber der Situation 2011/2012 reduziert haben. So betragen damals die Mehrkosten bei den Solobussen ca. 25 ct/km (jetzt: 14-25 ct/km) und bei den Gelenkbussen 32 ct/km (jetzt: 25-29 ct/km).

## 6.2.2 Systembedingte Zusatzkosten beim Hybridbuseinsatz (BbA)

### 6.2.2.1 Überblick

Einen Überblick über die systembedingten Zusatzkosten gibt nachfolgende Abbildung 40.

Auch die systembedingten Zusatzkosten wurden bereits im Rahmen des Förderprogramms "Hybridbusse für einen umweltfreundlichen ÖPNV" 2012 ermittelt und ausführlich dokumentiert [TÜV NORD et al., 2012].

Systembedingte Zusatzkosten	
<b>Vorhaltung Fahrzeugreserve</b>	zusätzliche Reservevorhaltung an Fahrzeugen (v.a. aufgrund geringerer Verfügbarkeit) ...
<b>Personalschulungen Fahrdienst und Werkstatt</b>	Fahrerschulungen (zum spezifischen Umgang mit Hybridfahrzeugen) Aus-/Weiterbildung des Werkstattpersonals (hybridspezifische Elektro-/Steuerungstechnik) ...
<b>Anpassung Werkstattrausüstung</b>	Zusatzausstattung/Umbauanforderungen der Werkstätten/Versorgungseinrichtungen/Abstellanlagen (z.B. Dacharbeitsbühnen, Umrüstung Waschanlage, ...) ...
<b>Optimierung des Fahrzeugeinsatzes</b>	Analyse Streckenprofile und Anpassung Fahrzeugumlaufplanung Analyse klimatischer Bedingungen ...

Abbildung 40: Systembedingte Zusatzkosten

#### A – Vorhaltung Fahrzeugreserve

Die Vorhaltung Fahrzeugreserve umfasst nur diejenigen zusätzlich erforderlichen Fahrleistungen durch Reservefahrzeuge, die aus einer ggf. geringeren technischen Verfügbarkeit der Hybridbusse gegenüber konventionellen Dieselfahrzeugen resultieren.

Es hat sich gezeigt, dass die Verfügbarkeit der Hybridfahrzeuge die dominierende Einflussgröße im Hinblick auf die systembedingten Zusatzkosten ist; hier sind allerdings ggf. neue Erkenntnisse bezüglich der technischen Verfügbarkeit von Hybridfahrzeugen zu berücksichtigen.

#### B – Personalschulungen

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

#### C – Anpassung Werkstattausrüstung

Unter Anpassungen Werkstattausrüstung werden alle hybridbedingten Anschaffungen subsumiert, d.h. sowohl technische Ein-/Umbauten in den Betriebshöfen und Werkstätten als auch Diagnosesysteme, Werkzeuge oder persönliche Schutzausrüstungen der Mitarbeiter.

#### D – Optimierung Fahrzeugeinsatzes

Die Optimierung des Fahrzeugeinsatzes umfasst die (vorwiegend planerischen) zusätzlichen Leistungen im Vorfeld und laufenden Betrieb von Hybridbussen, die sich zumindest im Begleitprogramm 2012 zur Erreichung maßgeblicher Verbrauchsreduzierungen vielfach als notwendig erwiesen haben und die daher hier kostenmäßig zu bewerten sind.

Von den Betreibern wurden Angaben zu Kosten für Personalschulungen, Anpassung der Werkstattausrüstung und Ersatzteilverhaltung abgefragt; die Daten zur Fahrzeugverfügbarkeit der Hybridbusse liegen aufgrund der Betriebsdatenerfassung vor.

#### 6.2.2.2 Ergebnisse

Hinsichtlich der systembedingten Zusatzkosten ist nach heutigem Kenntnisstand davon auszugehen, dass

- die Verfügbarkeit der Hybridbusse inzwischen im Bereich von 90 % und somit im Bereich üblicher Werte für konventionelle Dieselfahrzeuge liegt (vgl. Abbildung 17 in Kapitel 5.2.1).  
Eine zusätzliche Fahrzeugreserve, wie im Vorprojekt 2012 noch einkalkuliert, erscheint somit inzwischen entbehrlich.
- Kostenmäßig kaum von Belang sind Personalschulungskosten und die Kosten für die Optimierung des Fahrzeugeinsatzes, wenn man diese über die Laufzeit des Fahrzeugeinsatzes verteilt.
- Die Anpassung der Werkstattausrüstung spielt vor allem bei der Erstbeschaffung von Hybridbussen und bei kleineren Hybridbusflotten eine Rolle.

Die aktuelle Erhebung zeigt, dass hier insgesamt über die Nutzungsdauer max. 0,01 €/km anzusetzen sind.

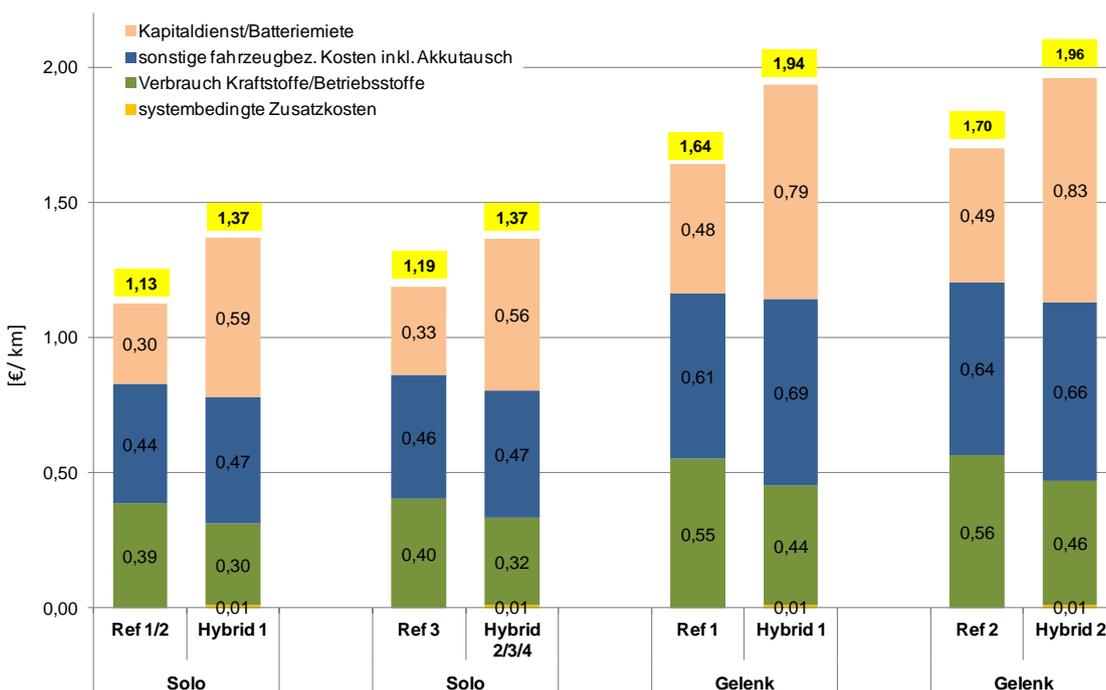
### 6.2.3 Ladeinfrastrukturbedingte Zusatzkosten für Plug-In-Hybride

Zu den ladeinfrastrukturbedingten Zusatzkosten für Plug-In-Hybride zählen neben den Ladestationen in Abstellanlagen auch Nachladestationen im Streckennetz, Kosten für evtl. notwendige Anpassungen der lokalen Stromversorgung und ggf. Mehrkosten durch ausgeprägte Spitzenlasten im Rahmen geltender Stromtarife.

Da die Plug-In-Hybridbusse sich erst seit Juli 2015 im Regeleinsatz befinden, liegen mit Ausnahme der Beschaffungskosten für die Ladeinfrastruktur noch keine belastbaren Informationen aus dem Praxisbetrieb vor. An dieser Stelle wird deshalb auf die überschlägigen Modellrechnungen in Abschnitt 7.3 verwiesen.

### 6.2.4 Gesamtkosten (BbA)

Hochgerechnet auf 12 Nutzungsjahre und 60 Tkm p.a. ergibt sich danach derzeit folgende Situation:

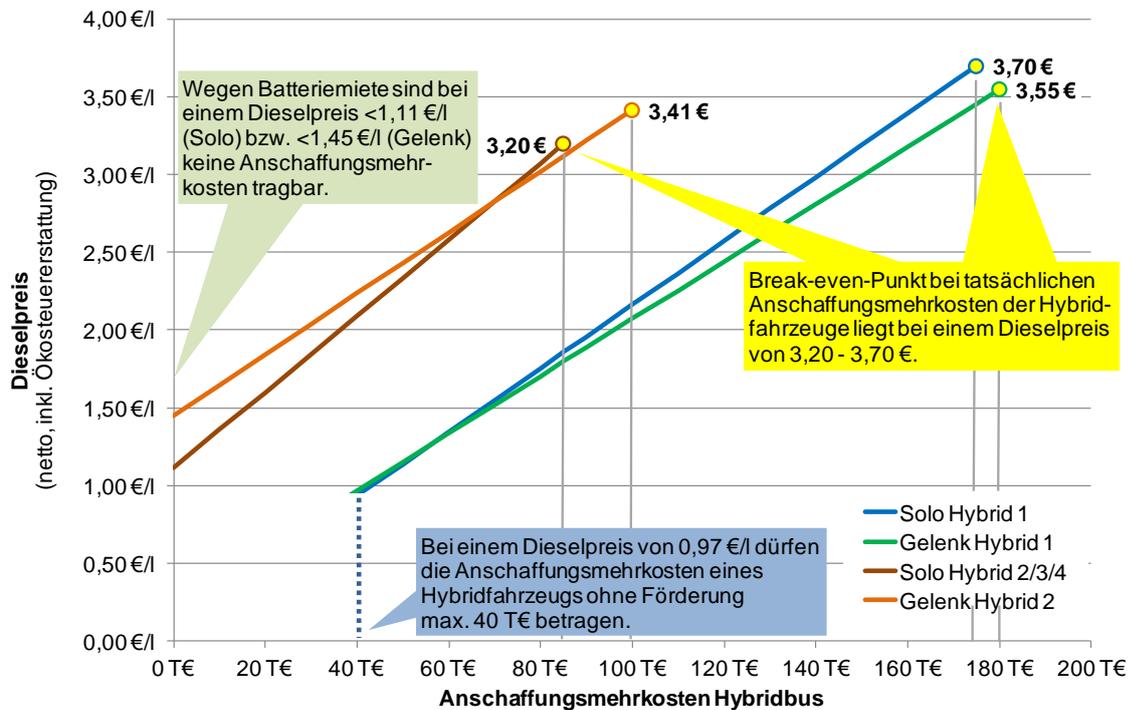


**Abbildung 41: Gesamtkosten im Vergleich**  
(normiert auf 60 Tkm p.a. und Nutzungsdauer 12 Jahre)

### 6.2.5 Break-even-Analyse (BbA)

In den folgenden Abbildungen sind exemplarisch die Break-even-Verläufe in Abhängigkeit von Anschaffungsmehrkosten (ggf. inkl. Batteriemiete) und der Entwicklung der Kraftstoffpreise dargestellt; dabei werden die realisierten Verbrauchseinsparungen zwischen 18,8% und 22,9% (vgl. Abbildung 30) gegenüber Diesel-Referenzbussen und eine Laufleistung von 60 Tkm p.a. zu Grunde gelegt. Dargestellt sind

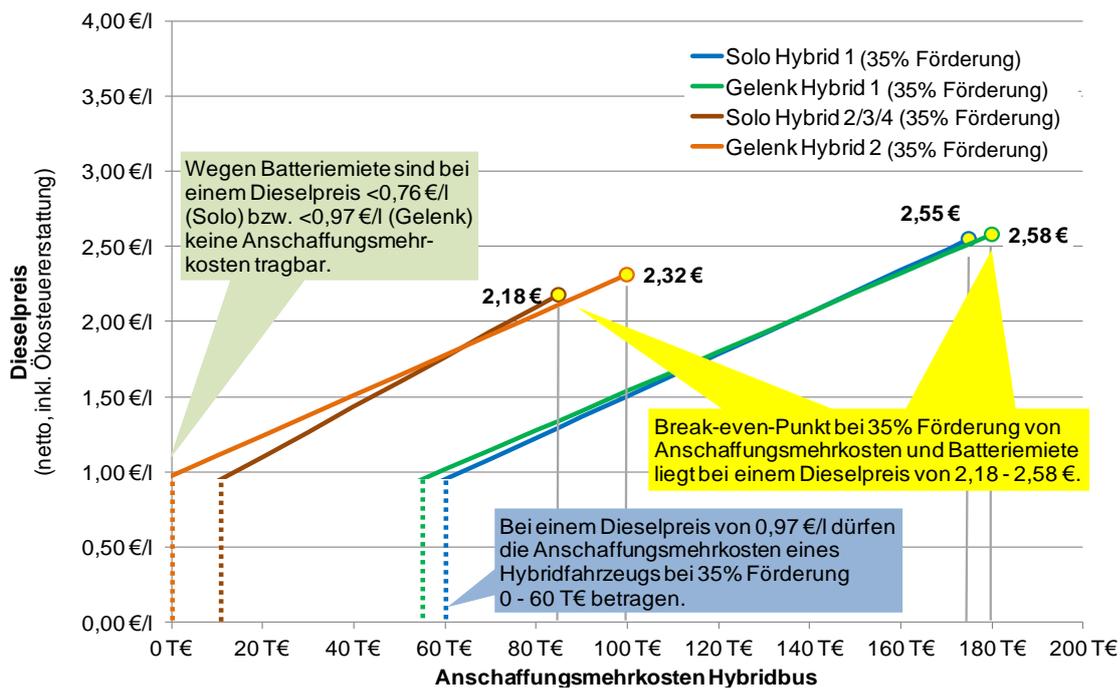
- in Abbildung 42 nicht geförderte Hybridbusse,
- in Abbildung 43 mit 35% der Anschaffungsmehrkosten (ggf. inkl. Batteriemiete) geförderte Hybridbusse entsprechend der gegenwärtigen Förderbedingungen der aktuellen BMUB Förderrichtlinie [BMUB, 2014] sowie
- in Abbildung 44 mit 25% der Anschaffungsmehrkosten (ggf. inkl. Batteriemiete) geförderte Hybridbusse im Sinne einer Sensitivitätsanalyse.



**Abbildung 42: Break-even-Verlauf für Hybridbusse – ohne Förderung**

als Funktion des Dieselpreises und der Anschaffungsmehrkosten bei der gegenwärtig realisierten Kraftstoffeinsparung gegenüber den Diesel-Referenzbussen

Bei einer um 5%-Punkte höheren Kraftstoffeinsparung lägen die Break-even-Punkte im Mittel ca. 68 ct ( $\pm 4$  ct) niedriger, d.h. in einem Dieselpreisbereich von 2,5 - 3 € / Liter.

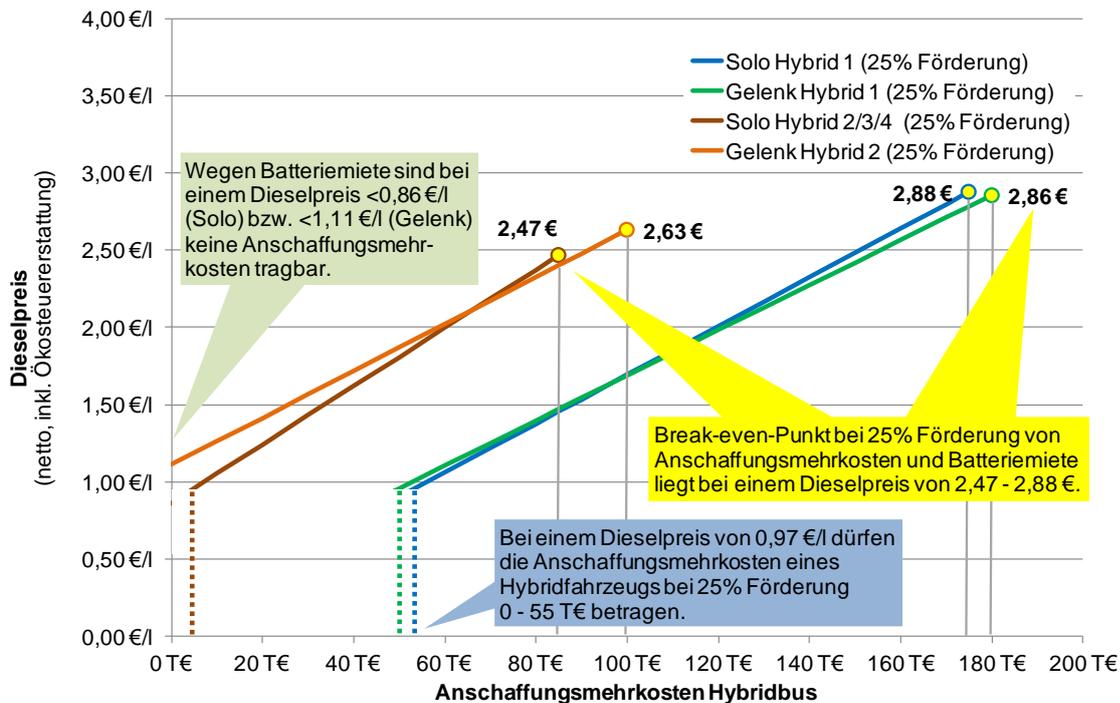


**Abbildung 43: Break-even-Verlauf für mit 35% geförderte Hybridbusse**

als Funktion des Dieselpreises und der Anschaffungsmehrkosten bei der realisierten Kraftstoffeinsparung gegenüber den Diesel-Referenzbussen

Bei einer um 5%-Punkte höheren Kraftstoffeinsparung, d.h. 25% statt 20% relative Kraftstoffersparnis, lägen die Break-even-Punkte im Mittel ca. 47 ct (±4 ct) niedriger.

Liegt die Förderung bei 25% der Anschaffungsmehrkosten (inkl. evtl. anfallender Batteriemietkosten) ergibt sich folgendes Bild:



**Abbildung 44: Break-even-Verlauf für mit 25% geförderte Hybridbusse**

als Funktion des Dieselpreises und der Anschaffungsmehrkosten bei der realisierten Kraftstoffeinsparung gegenüber den Diesel-Referenzbussen

Bei einer um 5%-Punkte höheren Kraftstoffeinsparung lägen die Break-even-Punkte im Mittel ca. 53 ct ( $\pm 4$  ct) niedriger.

Insgesamt ist festzustellen, dass sich in allen Fällen die heutigen Anschaffungsmehrkosten für Hybridfahrzeuge (ggf. inkl. Batteriemiete) erst bei deutlich höheren Kraftstoffkosten amortisieren.

Entsprechend müssten die Anschaffungsmehrkosten (ggf. inkl. Batteriemiete) bei den heutigen Kraftstoffpreisen um mehr als 60 T€ zurückgehen, damit sich Hybridfahrzeuge auch unter den aktuellen Rahmenbedingungen amortisieren.

### **6.2.6 Abschätzung Umweltkosten und Integration in Gesamtkosten (thinkstep, BbA)**

Die Förderung der Einführung von Hybridbussen stellt eine umweltpolitische Maßnahme dar, die eine Verringerung der volkswirtschaftlichen Kosten für Gesundheit und Umwelt gerade in Ballungsräumen in Gegenwart und Zukunft zum Ziel hat.

Die Schätzung von Umweltkosten ermöglicht es, den ökonomischen Nutzen umweltpolitischer Maßnahmen zu beziffern. Sie trägt zum einen dazu bei, die Diskussion um Kosten und Nutzen von Umweltschutzmaßnahmen zu versachlichen, und liefert zum anderen wichtige Anhaltspunkte für die wirksame Gestaltung von Umweltschutzinstrumenten.

Eine Berücksichtigung der Umweltkosten ist sinnvoll, da nach rein betriebswirtschaftlichen Kriterien bestimmte Kosten häufig den „Verzehr“ der Natur und potenziellen Schaden an der menschlichen Gesundheit nicht adäquat berücksichtigen: Über die reinen Betriebskosten eines Diesel- oder Hybridbusses erhält das Verkehrsunternehmen bzw. der Fahrgast kein Signal zum schonenden Umgang mit der Umwelt. Es entstehen folglich ggf. Wettbewerbsverzerrungen zu Lasten umweltfreundlicher Produkte, wie hier zu Lasten der Hybridbusse (siehe die vorangegangenen Kapitel 6.2.4 und 6.2.5).

Die nachfolgend durchgeführte Schätzung der Umweltkosten verwendet die vom Umweltbundesamt erarbeitete Methodenkonvention 2.0 zur Schätzung von Umweltkosten [UBA, 2012]. Für die Bestimmung der Umweltkosten werden die Best-Practice-Kostensätze für Luftschadstoffe im Verkehr verwendet. Hierzu wird die emittierte Menge an verschiedenen Luftschadstoffen entlang des kompletten Lebenszyklus massenmäßig erfasst. Im Einzelnen werden die Treibhausgase (gemessen in kg CO<sub>2</sub> Äquivalent), die Emissionen an Partikeln (PM 2,5 und PM 2,5-10), Stickoxiden (NO<sub>x</sub>), Schwefeldioxid (SO<sub>2</sub>), Nicht-Methan Kohlenwasserstoffe (NMVOC) und Ammoniak (NH<sub>3</sub>) bilanziert. Berücksichtigt werden der Busbetrieb mit seinen verbrennungsmotorisch bedingten Abgasemissionen, den Feinstaubemissionen aus Aufwirbelung und Abrieb im Straßenverkehr, die Herstellung, Wartung und Entsorgung bzw. Verwertung des Stadtbusses sowie die Kraftstoffbereitstellung. Darüber hinaus finden die Lärmemissionen im Betrieb ebenfalls Eingang in die Schadenskostenberechnung.

Die verwendeten Schadenskostensätze nach [UBA, 2012] sind in

Tabelle 18 zusammengestellt.

**Tabelle 18: Best Practice Schadenkostensätze im Verkehr in Deutschland**

<b>Schadensart</b>	<b>Schadenskostenfaktor</b> (in € <sub>2010</sub> / t)	<b>Bemerkung</b>
Klimakosten	80	Mittlerer Wert UBA-Empfehlung zu Klimakosten in t CO <sub>2</sub> Äquivalent
PM <sub>2,5</sub>	364.100 / 122.800	aus Auspuff, Innerorts / Kraftstoffbereitstellung, Außerorts
PM <sub>2,5-10</sub>	10.200 / 2.900	Abrieb, Aufwirbelung, Innerorts / Kraftstoffbereitstellung, Außerorts
PM 10	33.700 / 11.000	10% PM <sub>2,5</sub> , 90% PM <sub>2,5-10</sub> Abrieb, Aufwirbelung, Innerorts / Herstellung, Wartung, Verwertung, Außerorts
NO <sub>x</sub>	15.400	Herstellung, Betrieb (inkl. Kraftstoffbereitstellung), Wartung, Verwertung
SO <sub>2</sub>	13.200	
NM <sub>VOC</sub>	1.700	
NH <sub>3</sub>	26.800	

Eine Abschätzung der Umweltkosten ist für die Solobusse möglich, da hier die entsprechenden Daten zu Verbrauch, Schadstoffemissionen und Lärm sowie die jeweilige relative Veränderung dieser Parameter bei den Hybridbussen verfügbar sind [EFBEL, 2015]. Für die in der Kostenanalyse betrachteten Gelenkhybridbusse sind die Schadstoffemissionsdaten bisher nicht verfügbar, außerdem fehlen für einen Gelenkhybrid die Lärmemissionsdaten. Daher können die Umweltkosten der Gelenkhybridbusse zunächst nicht weiter im Detail betrachtet werden. Grundsätzlich sind hier aber ähnliche Ergebnisse wie für die Solohybridbusse zu erwarten, da z.B. die Verbrauchseinsparungen mit 21% und 19% in einem ähnlichen Bereich liegen wie bei den Solohybridbussen und auch sonst aufgrund der verwendeten Antriebs- und Abgasreinigungstechnologie kein grundlegend anderes Verhalten der Gelenkhybridbusse zu erwarten ist.

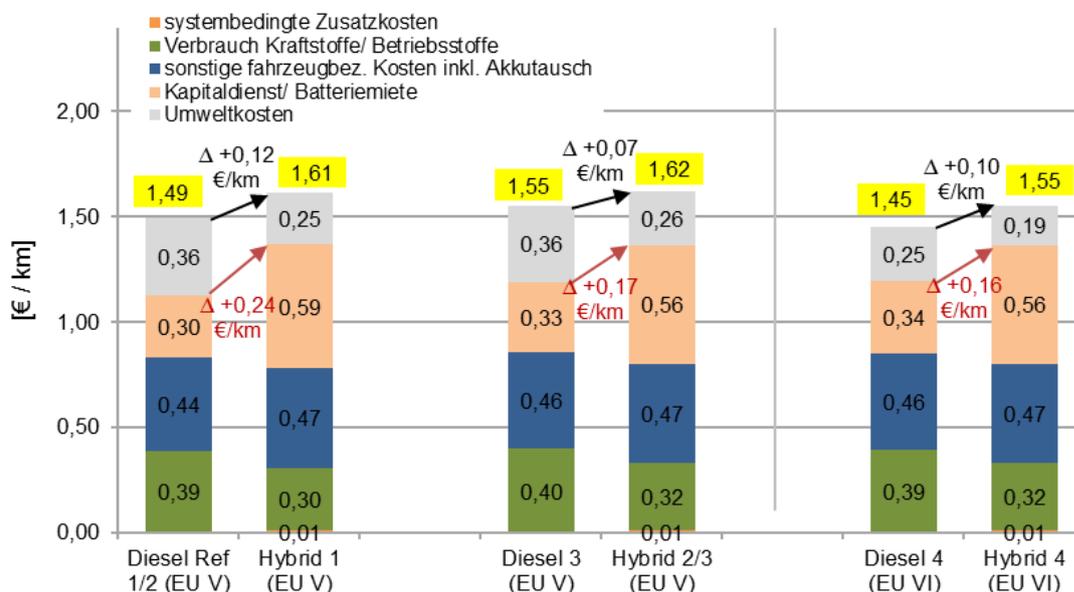
Aus den im Rahmen der Langzeitdatenerfassung ermittelten Verbräuche und Verbrauchseinsparungen (alle Euro V Busse), HBEFA Emissionsdaten für das Diesel Euro V Fahrzeug mit SCR Abgasreinigung, Schadkosten für Lärmemissionen (tagsüber) der konventionellen Dieselsebuse aus [UBA, 2012] sowie den im EFBEL Projekt ermittelten Einsparungen bei den Luftschadstoff- und Lärmemissionen ergeben sich die in

Tabelle 19 angegebenen Umweltkosten. Für das Euro VI Diesel Fahrzeug werden HBEFA Werte genutzt, der Verbrauch wird entsprechend den EFBEL ermittelten Verbrauchseinsparungen angepasst. Aus dem EFBEL Projekt werden wiederum die Emissionseinsparungen für den Hybrid Euro VI verwendet. Die Umweltkosten aller Busse beinhalten ferner die Kraftstoffbereitstellungsdaten aus [GaBi, 2015] und die Herstellung, Wartung und Verwertung sowie die abriebbedingten Partikelemissionen und schließlich die Kosten für Schäden an Natur und Landschaft aus [UBA, 2012].

**Tabelle 19: Abgeschätzte Umweltkosten Solobusse je Fahrzeugkilometer in Deutschland**

Fahrzeugtyp	Umweltkosten (in €-cent <sub>2010</sub> <sup>5</sup> / km)	Quellen/ Bemerkung
Diesel Solo Euro V	36,4 / 36,3	Langzeitdatenerfassung, [HBEFA, 2014], [EFBEL, 2015], [GaBi, 2015], eigene Berechnungen
Hybrid Solo 2/3 Euro V	25,6	
Hybrid Solo 1 Euro V	24,7	
Diesel Euro VI	25,4	[HBEFA, 2014], [EFBEL, 2015], [GaBi, 2015], eigene Berechnungen
Hybrid Solo 4 Euro VI	18,5	

Die abgeschätzten Umweltkosten können nun im Sinne einer möglichst vollständigen Gesamtkostenbetrachtung, d.h. inkl. Berücksichtigung der unterschiedlichen Umweltauswirkungen von konventionellen Dieseln und Hybridbussen, in die in Kapitel 6.2.4 durchgeführte Gesamtkosten mit einbezogen werden. Am Beispiel der in Abbildung 45 dargestellten Ergebnisse für die Euro V Solobusse ist erkennbar, dass die Kostenlücke, d.h. die Differenz zwischen Hybrid- und Dieseln, in diesem Falle merklich abnimmt. Lag die Differenz bei einer rein betriebswirtschaftlichen Kostenanalyse in Kapitel 6.2.4 noch bei 24 bzw. 18 €-cent/km, beträgt sie unter Berücksichtigung der abgeschätzten Umweltkosten noch 12 bzw. 7 €-cent/km. Prozentual betrachtet reduzieren sich die Mehrkosten von 21% (rein betriebswirtschaftlich, auf Basis 1,13 €/km) nach 8% (inkl. Umweltkosten) für den Hybrid 1 bzw. 15% (auf Basis 1,19 €/km) nach 4% beim Hybrid 2/3/4.

**Abbildung 45: Gesamtkosten Solobusse (Euro V und VI) inkl. abgeschätzter Umweltkosten (ohne Förderung)**

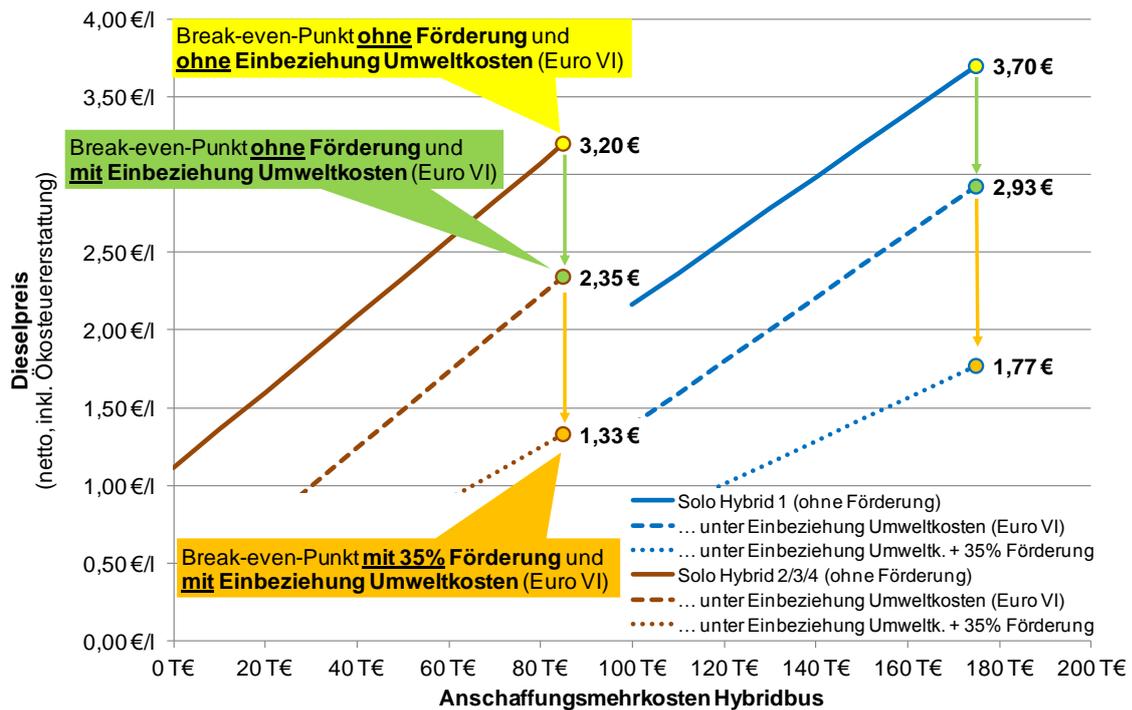
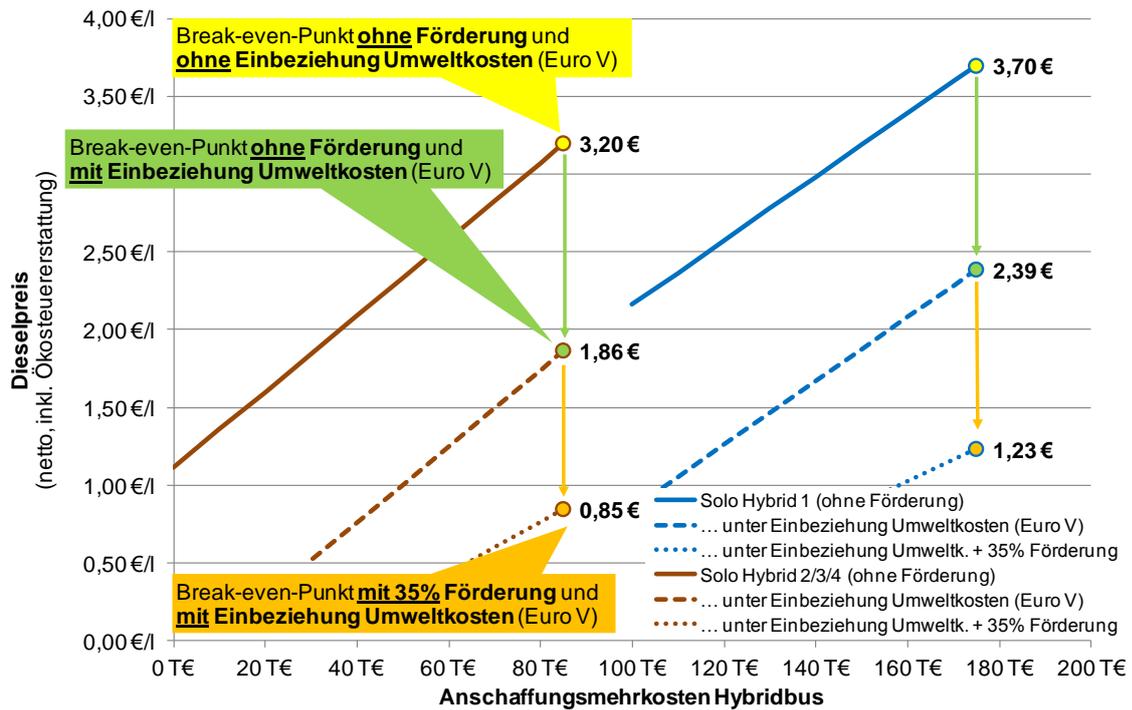
<sup>5</sup> Auf eine Anpassung der Schadenskostensätze entsprechend des Harmonisierten Verbraucherindex von 2010 auf 2014 wurde aus Gründen der Einfachheit und besseren Vergleichbarkeit mit den in [UBA, 2012] genannten Werten und Einfachheit verzichtet.

Für Euro VI fällt die Differenz zwischen Diesel- und Hybridbussen bei den Umweltkosten vor allem aufgrund der signifikant reduzierten NO<sub>x</sub> Emissionen niedriger aus. Hier beträgt die Differenz nach einer ersten Überschlagsrechnung ca. 7 €-cent/km anstatt den 10-11 €-cent/km, die sich bei den Euro V Bussen ergeben. Die Kostenlücke wird damit aber nach wie vor spürbar reduziert.

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

### *Break-Even-Analyse*

Wird eine (bislang nicht vorgesehene) Übernahme der Umweltkosten durch die öffentliche Hand für die untersuchten Solobusse auf analoge Weise in die in Kapitel 6.2.5 vorgenommene Break-Even-Analyse integriert, ergibt sich die in Abbildung 46 dargestellte Entwicklung der für eine Erreichung der Kostenäquivalenz erforderlichen Kraftstoffpreise, jeweils unterschieden nach den Abgasnorm Euro V und Euro VI:



**Abbildung 46: Break-even-Verlauf für mit 35% der Anschaffungsmehrkosten geförderte Euro V- und Euro VI-Hybridbusse inkl. Umweltkosten**

als Funktion des Dieselpreises und der Anschaffungsmehrkosten bei der realisierten Kraftstoffeinsparung gegenüber den Diesel-Referenzbussen (Euro V bzw. Euro VI)

Aufgrund der bei Euro VI niedrigeren Umweltkosten auch der konventionellen Diesel-Referenzbusse reduziert sich der erforderliche Kraftstoffpreis für den Break-Even-Punkt der Kosten von 3,20 bzw. 3,70 €/l Diesel bei Euro VI zunächst auf 2,35 bzw. 2,93 €/l Diesel. Wird

dazu noch die bisherige 35%ige Förderung der Anschaffungsmehrkosten berücksichtigt, ergeben sich Kraftstoffkosten von 1,33 bzw. 1,77 €/l Diesel die zu einer Kostenäquivalenz zwischen Hybrid- und konventionellen Dieseln führen.

Im Fall von Euro V würde sich nach Berücksichtigung der Umweltkosten zunächst ein Kraftstoffpreis von 1,86 bzw. 2,39 €/l Diesel für den Break-Even-Punkt der Kosten ergeben. Eine 35%ige Förderung der Anschaffungsmehrkosten reduziert den erforderlichen Kraftstoffpreis zur Erreichung der Kostenäquivalenz auf 0,85 bzw. 1,23 €/l Diesel.

Damit würde beim aktuellen Dieselpreisniveau zumindest im Euro V-Vergleich die betriebswirtschaftliche Wettbewerbsfähigkeit der Hybridbusse teilweise ermöglicht.

Da gerade im Fall der heutigen Euro VI Fahrzeuge auch unter Berücksichtigung der Umweltkosten aktuell ein gesamtwirtschaftlicher Kostennachteil der Hybridbusse verbleibt, erscheint die derzeit erforderliche Förderung primär als Anschubfinanzierung für eine Übergangszeit gerechtfertigt. Die Hersteller bleiben aufgefordert, durch deutliche Reduzierung des Preisniveaus und/oder der Kraftstoffverbräuche die bestehende Wirtschaftlichkeitslücke der Hybridbusse zu schließen.

## 7 Effizienzanalyse in Abhängigkeit von Einsatzbedingungen (AP3)

### 7.1 Streckenanalyse (IVI, thinkstep, ika, TÜV)

Aus bisherigen Untersuchungen war bekannt, dass der Kraftstoffverbrauch bzw. die Kraftstoffeinsparungen gegenüber konventionellen Dieseln u. a. stark von den Liniencharakteristiken abhängen. Hierzu zählen

- die Topographie, insb. die Länge von zusammenhängenden Steigungs- bzw. Gefällestrecken,
- die mittlere Reisegeschwindigkeit,
- die Anzahl von Halten pro Kilometer sowie
- die Fahrgastnachfrage.

Im Zuge der vorliegenden Untersuchung wurden erstmals verschiedene Datenbanken der Projektpartner über den Kraftstoffverbrauch von Hybridbussen bzw. deren Kraftstoffeinsparungen gegenüber konventionellen Dieseln zusammengeführt und einheitlich ausgewertet. Ergänzt wurden die Daten durch weitere, innerhalb des Projektes erhobene Verbrauchswerte und Informationen weiterer Hybridbusbetreiber.

#### 7.1.1 Datengrundlage

##### 7.1.1.1 Hybridsysteme

In die Untersuchungen konnten insgesamt sechs Kombinationen aus Fahrzeuglänge und Hybridsystem einbezogen werden.

- Gelenkbusse (18 m):
  - serieller Hybridantrieb mit Batterie
  - serieller Hybridantrieb mit Superkondensatorspeicher (Supercaps)
  - leistungsverzweigter Hybridantrieb mit Batterie
  - paralleler Hybridantrieb mit Batterie.
- Solobusse (12 m):
  - serieller Hybridantrieb mit Superkondensatorspeicher (Supercaps)
  - paralleler Hybridantrieb mit Batterie.

##### 7.1.1.2 Definition von Topographieklassen

Die vorliegenden Daten zeigen, dass die Topographie einer Linie und hierbei insbesondere der Anteil langer ununterbrochener Steigungs- und Gefällestrecken einen großen Einfluss auf den Kraftstoffverbrauch von Hybridbussen bzw. deren Kraftstoffeinsparungen gegenüber konventionellen Dieseln haben können. Basierend auf den zur Verfügung stehenden Daten wurden fünf Topographieklassen definiert. Grundlage für die Festlegung der Topographieklassen ist der Gesamtanteil an sog. „kritischen Steigungen“. Das sind Streckenanteile mit durchgehender Steigung bzw. durchgehendem Gefälle mit einer Gesamtsteigung von mindestens 25 Höhenmetern per Kilometer und einer Mindestlänge von 700 Metern. Dabei unterbrechen

einzelne sehr kurze ebene Teilstücke die kritische Steigung nicht. Längere oder häufige Unterbrechungen oder Abschnitte mit entgegengesetztem Gefälle beenden die kritische Steigung. Der Anteil kritischer Steigungen wird bestimmt, indem die Länge der kritischen Steigungen und Gefälle addiert wird und durch die Gesamtlänge der Strecke geteilt wird. Als weitere Orientierung innerhalb der Topographiekategorie dient die Angabe der darin enthaltenen Streckenanteile mit stärkerer Neigung bzw. zusätzlicher meist kurzer sehr starker Anstiege (s. Tabelle 20).

Die vorhandenen Daten stammen größtenteils von Strecken aus den Topographieklassen T1 bis T3. In Topographiekategorie T5 konnten unter den betrachteten Strecken nur separat gemessene Linienabschnitte eingeordnet werden. Da damit nur vereinzelt Werte vorlagen, wird T5 in den nachfolgenden Auswertungen nicht weiter betrachtet.

**Tabelle 20: Festlegung der Topographieklassen**

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

Für die Klassifizierung der Daten aus Verkehrsbetrieben, die ihre Fahrzeuge nicht linienrein sondern im gesamten Netz einsetzen, wurde so verallgemeinert, dass die am häufigsten befahrenen Strecken den Ausschlag für die Bewertung gaben. Dementsprechend wurden die Daten aus Hannover und Hamburg aufgrund der grundsätzlich geringen Höhenunterschiede T1 zugeordnet, desgleichen die Werte aus Ingolstadt, da sich diese hauptsächlich auf ein Linienbündel im ebenen Teil des Streckennetzes bezogen. Die Daten aus Wolfsburg hingegen wurden in T2 eingereiht.

#### 7.1.1.3 Definition von Geschwindigkeitsklassen

Zur Berücksichtigung des Einflusses der mittleren Reisegeschwindigkeiten auf die Kraftstoffeinsparungen wurden in Anlehnung an die Durchschnittsgeschwindigkeiten der SORT-Zyklen und basierend auf den vorliegenden Daten vier Geschwindigkeitsklassen mit

- 10 - 15 km/h
- 15 - 20 km/h
- 20 - 25 km/h
- >25 km/h

definiert. Daten mit unter diesen Geschwindigkeitsklassen liegenden mittleren Reisegeschwindigkeiten lagen nicht vor. Durch diese relativ grobe Klassifizierung lassen sich Unterschiede in der Bezugsgrundlage bei der Betrachtung der durchschnittlichen Reisegeschwindigkeiten auf der Linie, im Fahrzeugumlauf oder im Netzeinsatz besser ausgleichen.

7.1.1.4 Einbeziehung weiterer Einflussgrößen

Die zur Verfügung stehende Datengrundlage gestattete es nicht, den Einfluss der Anzahl der Halte pro Kilometer und der Fahrgastnachfrage gesondert zu analysieren. Da beide Größen aber zusammenhängen und gleichzeitig die mittlere Reisegeschwindigkeit beeinflussen, wird der dadurch entstehende Informationsverlust als gering angesehen. Hinzu kommt, dass sich die Anzahl von Halten pro Kilometer nur bedingt als Kriterium für eine Entscheidungsfindung durch Verkehrsbetriebe eignen, da diese Werte zumeist nicht bekannt sind bzw. aufwendig ermittelt werden müssen.

7.1.1.5 Überblick über die vorhandenen Daten

Gelenkbusse

Einen Überblick über die zur Verfügung stehenden Daten von Gelenkbussen gibt Abbildung 47. Die Geschwindigkeitsklassen, für die Daten ausgewertet werden konnten, repräsentieren typische Einsatzfälle von Gelenkbussen mit hoher Fahrgastnachfrage und gleichzeitiger Bevorrechtigung im Straßenverkehr.

		Topographiekategorie			
		T1	T2	T3	T4/T5
Geschwindigkeitsklasse [km/h]	> 25	SC	SC		SC
	20 - 25	SB	SB	SB	SB SC
		SC	SC	SC	
		LV			
15 - 20	SB		SB	LV	
	SC	SC	SC		
	PB	PB	PB		
10 - 15	LV		LV		
	SB				
	SC		SC	SC	
		LV			

Hybridkonzept  
 SC – seriell mit Supercaps  
 SB – seriell mit Batterie  
 PB – parallel mit Batterie  
 LV – leistungsverzweigt mit Batterie

Abbildung 47: Topographie- und Geschwindigkeitsklassen mit auswertbaren Daten für Gelenkbusse

Solobusse

Einen Überblick über die zur Verfügung stehenden Daten von Solobussen gibt Abbildung 48. Als nachteilig stellte sich heraus, dass nur drei Topographieklassen besetzt sind.

		Topographiekategorie			
		T1	T2	T3	T4/T5
Geschwindigkeitsklasse [km/h]	> 25	PB	SC	SC	
	20 - 25	SC PB	SC PB	SC PB	SC PB
	15 - 20	SC PB	SC PB	SC PB	
	10 - 15	PB SC	SC		SC

Hybridkonzept  
SC – seriell mit Supercaps  
PB – parallel mit Batterie

**Abbildung 48: Topographie- und Geschwindigkeitsklassen mit auswertbaren Daten für Solo-busse**

Insgesamt konnten 123 Datensatzpaare in die Auswertungen einbezogen werden. In Summe ergab sich trotz dieser umfangreichen Datengrundlage ein uneinheitliches Bild hinsichtlich der Datenkonsistenz, da

- Messungen in unterschiedlichen Jahreszeiten und in ungleichen Zeiträumen durchgeführt wurden,
- Messwerte aus Einsätzen im regulären Fahrgastbetrieb, aus sog. Zwillingstests und aus Testfahrten ohne Fahrgäste stammten,
- Messwerte aus dem Fahrgastbetrieb selten als linienreine Daten vorlagen sondern aus Einsätzen im Gesamtnetz,
- die Messwerte von Hybridfahrzeugen unterschiedlicher Generationen und unterschiedlicher Überarbeitungsstände stammten und
- die Referenzfahrzeuge nicht in jedem Fall den Anforderungen vollständig genügten.

Erschwerend über alle Daten hinweg kam hinzu, dass Verbrauchsdaten z. T. mit und teilweise ohne den Verbrauch der Zusatzheizung ermittelt wurden bzw. der Verbrauch aufgrund eines fehlenden Heizöltanks nicht separat ausgewiesen wurde.

## 7.1.2 Ergebnisse

### 7.1.2.1 Gelenkbusse

Für die Hybrid-Gelenkbusse zeigt sich bzgl. der Kraftstoffeinsparungen ein sehr inhomogenes Bild, da die Verbrauchseinsparungen der einzelnen Hybridkonzepte deutlich voneinander abweichen.

#### Paralleler Hybridantrieb mit Batterien

Für Hybridbusse mit Parallelantrieb konnten weitere Datensätze ausgewertet werden. Daraus ergibt sich folgendes Bild.

In der Topographiekategorie T1 betragen die Einsparungen an reinem Antriebskraftstoff 23,3 %, mit Hinzuziehung des Heizölverbrauchs immer noch 18,3 %. Dabei ist zu bemerken, dass anfangs nur geringe Verbrauchsunterschiede zu den Referenzbussen erzielt wurden, im Laufe

des Einsatzes diese jedoch merklich anstiegen, so dass ein weiterer Anstieg der Einsparungsrate zu erwarten ist. Die Reisegeschwindigkeit im Tagesbetrieb liegt bei knapp 15 km/h, unter Einbeziehung der weiteren in den Umläufen bedienten Linien- und Betriebsfahrten zwischen 16,5 und 17,6 km/h.

Tests in der Topographiekategorie T2 wiesen Einsparungen von bis zu 41 % gegenüber Dieselreferenzfahrzeugen aus. Obwohl die Tests außerhalb der kalten Jahreszeit durchgeführt wurden, also keine oder nur geringe Verbräuche durch die Zusatzheizung oder für Klimatisierung notwendig waren, deuten die Messwerte das Potenzial dieser Antriebsform an.

Für die Topographiekategorie T3 lagen Messwerte unter Einbeziehung des Verbrauchs der Zusatzheizung über einen längeren Zeitraum (2010 – 2014 / 2013 - 2014) für zwei unterschiedliche Fahrzeuge vor. Während das ältere Fahrzeug zwischen 5 und 6 % gegenüber dem Dieselfahrzeug sparte, konnte das neuere Fahrzeug (andere Herstellergruppe) Verbrauchsminderungen von 23 % aufweisen. Die durchschnittliche fahrplanmäßige Reisegeschwindigkeit beider Fahrzeuge war ähnlich und lag bei 17 bis 18 km/h.

Dieses Beispiel belegt, wie stark technische Entwicklungen und modifizierte technische Lösungen der Grundtechnologie die Kraftstoffeffizienz beeinflussen können.

#### Leistungsverzweigter Hybridantrieb mit Batterien

Busse mit leistungsverzweigtem Hybridantrieb und Batterien wurden als erste Hybridbusse in Europa kommerziell eingesetzt. Daher war es möglich, Busse aus zwei Entwicklungsgenerationen in die Untersuchungen einzubeziehen.

Die überwiegende Mehrzahl der Messdaten wurde für die Topographiekategorie T1 ermittelt. Die Ergebnisse in Abbildung 49 deuten für den auswertbaren Geschwindigkeitsbereich an, dass die Kraftstoffeinsparungen nicht oder nur unwesentlich von der mittleren Reisegeschwindigkeit abhängen. Lediglich unter Vernachlässigung der Zusatzheizung zeichnet sich ein Zusammenhang zwischen den Kraftstoffeinsparungen und der Reisegeschwindigkeit ab.

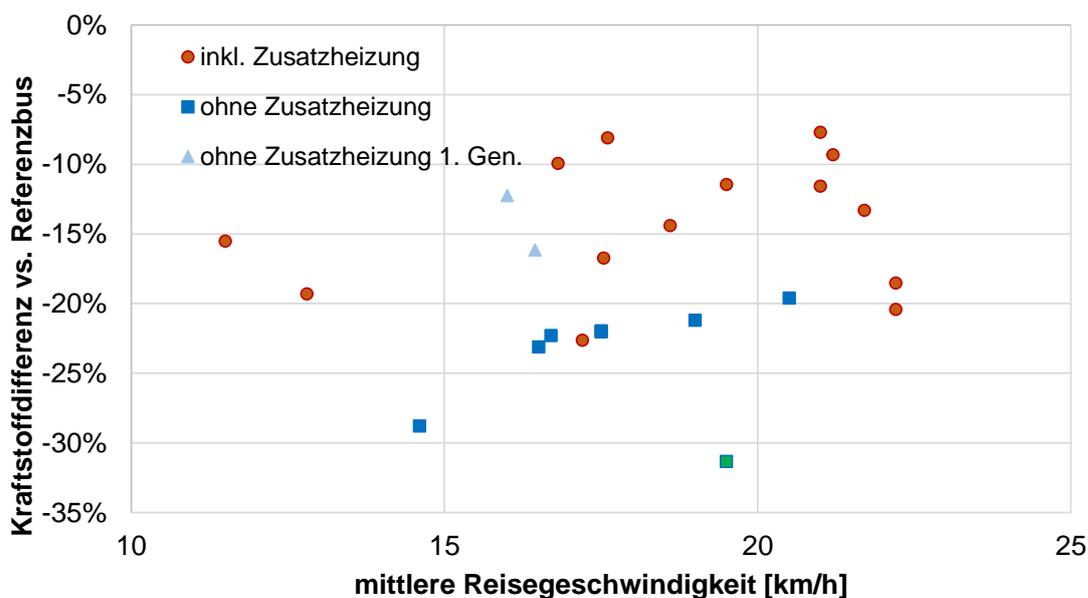


Abbildung 49: Relative Kraftstoffeinsparungen von leistungsverzweigten Hybridbussen für die Topographiekategorie 1

Für die Topographieklassen T3 und T4 lagen nur einzelne Werte für die erste Fahrzeuggeneration vor. Die Einsparungen lagen bei 13,7 % bzw. 11,2 %.

Fahrzeuge neuester Generation, in deren Auslegung Testergebnisse der Vorgänger einfließen, erzielten linienabhängig Einsparungen für Diesel und Heizöl von knapp über 22 %. Überarbeitungen der Bestandsfahrzeuge und sonstige Änderungen können zu einer erheblichen Steigerung des Einsparpotenzials führen, wie das grün markierte Quadrat in Abbildung 49 zeigt.

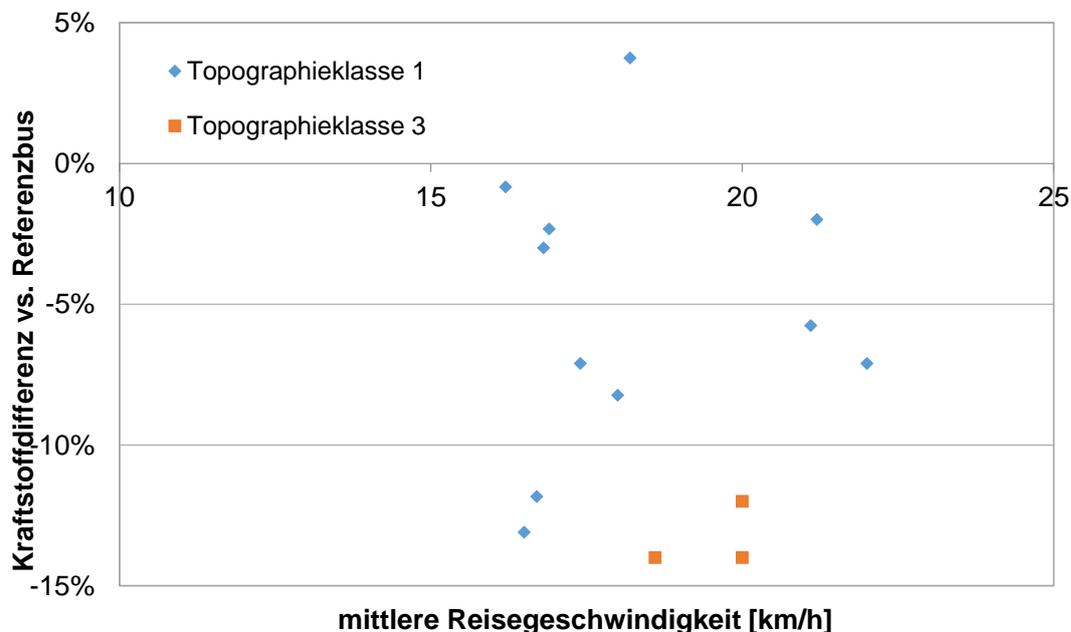
### Serieller Hybridantrieb

Gelenkhybridbusse mit serielltem Antrieb zeigten bei den verwendeten Messwerten durchweg zu geringe Kraftstoffeinsparungen um ihre systembedingten Mehrkosten betriebswirtschaftlich rechtfertigen zu können. Wie die Abbildung 50 und Abbildung 51 zeigen, erzielten die seriellen Hybridgelenkbusse mit Batteriespeicher höhere Kraftstoffeinsparungen als Fahrzeuge mit Superkondensatorspeicher.

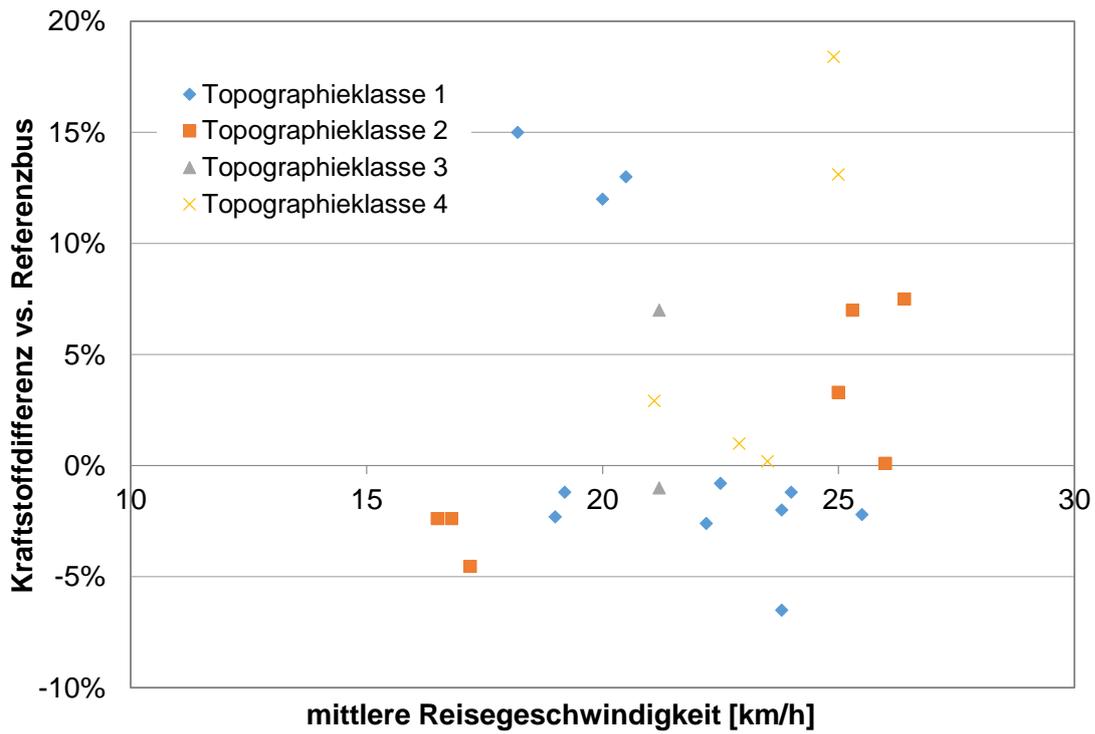
Bezüglich der mittleren Reisegeschwindigkeit lassen sich anhand der Daten keine signifikanten Unterschiede in den Kraftstoffeinsparungen erkennen.

Vergleichbar zu den Bussen mit leistungsverzweigtem Hybridantrieb wurden wesentliche Einsparungen meist auf Linien bzw. Linienabschnitten der Topographiekategorie 1 erzielt. Für diese Antriebsart ist es daher von besonderer Bedeutung, sie nur auf geeigneten Linien einzusetzen.

Zu berücksichtigen ist, dass in die Auswertung Daten von Fahrzeugen mit unterschiedlichen Softwareständen einfließen. Auch neuere Messergebnisse ändern an der Gesamteinschätzung nichts.



**Abbildung 50: Relative Kraftstoffeinsparungen von seriellen Gelenkhybridbussen mit Batterie** unter Berücksichtigung der Verbräuche der Zusatzheizung und in Abhängigkeit von der mittleren Reisegeschwindigkeit



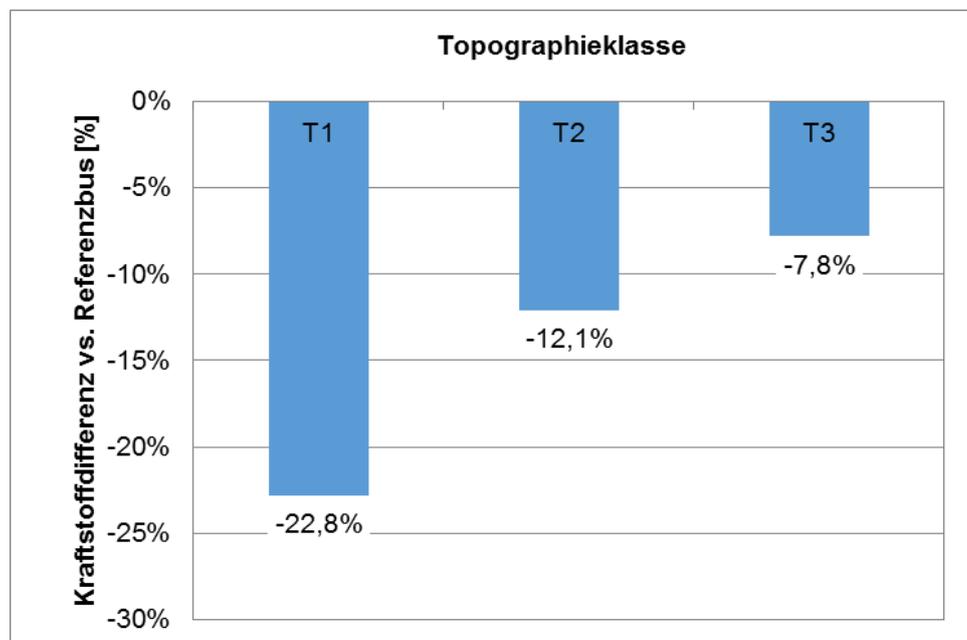
**Abbildung 51: Relative Kraftstoffeinsparungen von seriellen Gelenkhybridbussen mit Superkondensatorspeicher**  
 unter Berücksichtigung der Verbräuche der Zusatzheizung und in Abhängigkeit von der mittleren Reisegeschwindigkeit

### 7.1.2.2 Solobusse

#### Serieller Hybridantrieb mit Superkondensatorspeicher (Supercaps)

Für Solobusse mit serielltem Hybridantrieb und Superkondensatorspeicher lag die umfassendste und aussagekräftigste Datenbasis vor. Die Daten, bei denen es sich z. T. um Monatswerte in Zeitreihen handelte, konnten zu 24 miteinander vergleichbaren Datensätzen zusammengefasst werden.

Über alle Topographieklassen und Datensätze hinweg und ohne Gewichtung erzielten Solobusse mit serielltem Hybridantrieb und Superkondensatorspeicher auch unter Berücksichtigung des Verbrauchs der Zusatzheizung Kraftstoffeinsparungen von im Mittel 15 %. Obwohl nur die Topographieklassen T1 bis T3 mit Daten besetzt sind, zeigen die Ergebnisse in Abbildung 52 dabei eine klare Abhängigkeit zwischen den mittleren Kraftstoffeinsparungen und der Topographie einer Linie. Hierbei spielen insbesondere längere ununterbrochene Steigungs- und Gefällestrecken („kritische Steigungen“) eine übergeordnete Rolle. Bei den im jetzigen Programm befindlichen Bussen sind die Einsparungen durchweg höher. Sie betragen in Topografieklasse T1 knapp 27 % und in T2 reichlich 20%.



**Abbildung 52: Relative Kraftstoffeinsparungen von seriellen Solohybridbussen mit Superkondensatorspeicher**

unter Berücksichtigung der Verbräuche der Zusatzheizung und in Abhängigkeit von der Topographiekategorie (Mittelwerte der einzelnen Topographieklassen)

Die Auswirkungen der Topographie einer Linie, speziell der kritischen Steigungen auf die Kraftstoffeinsparungen zeigt auch der Vergleich verschiedener Linien in Abbildung 53. Die beiden ersten Linien weisen trotz bergiger Topographie nur niedrige Anteile kritischer Steigungen an der Gesamtstreckenlänge aus. Im Ergebnis wurden auf diesen Linien trotz deutlich höherer mittlerer Reisegeschwindigkeiten signifikante Kraftstoffeinsparungen erzielt. Im Gegensatz dazu wurden auf den Linien mit größerem Anteil kritischer Steigungen trotz niedrigerer Reisegeschwindigkeiten praktisch keine oder vernachlässigbar kleine Kraftstoffeinsparungen erzielt.

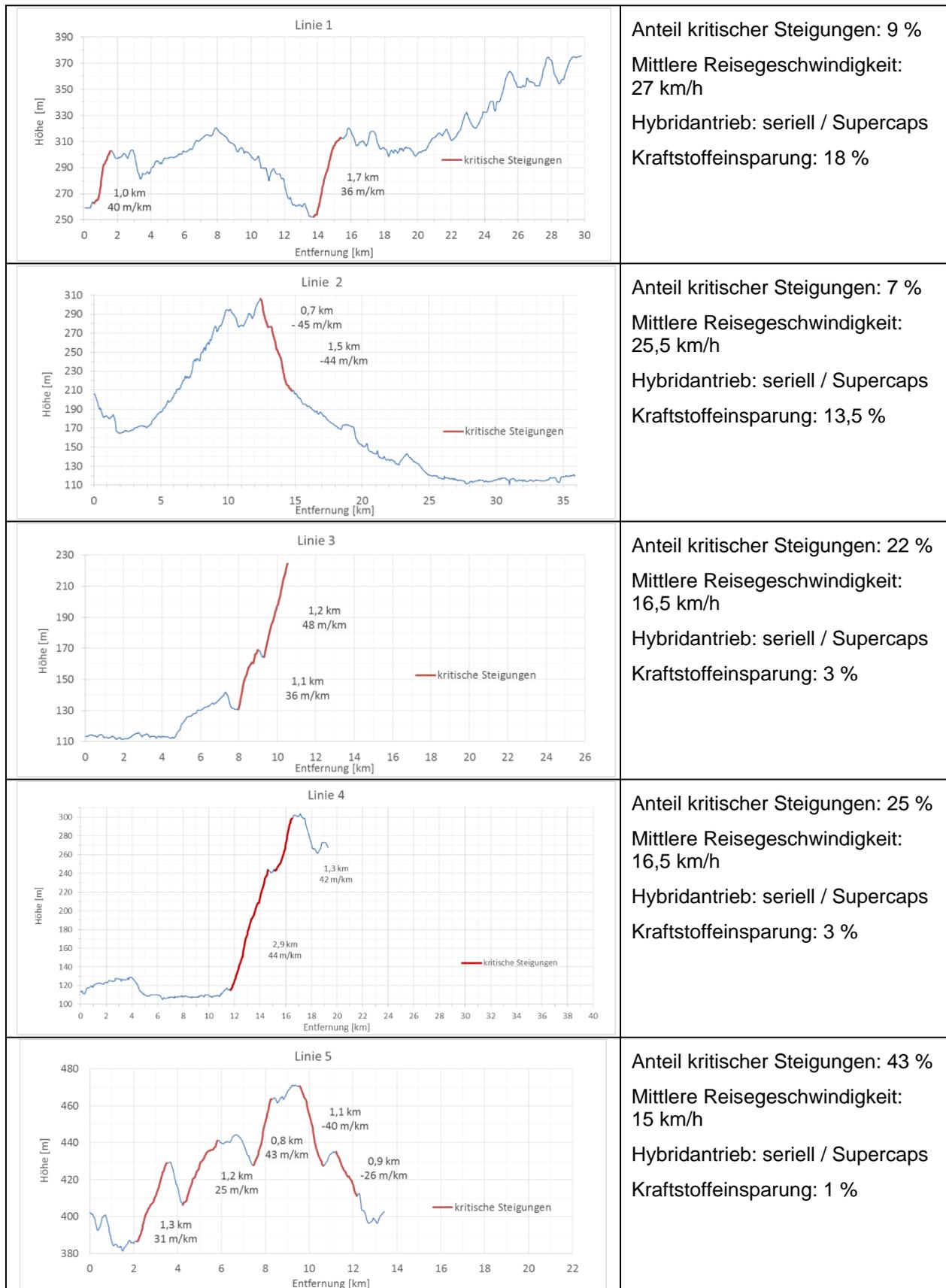


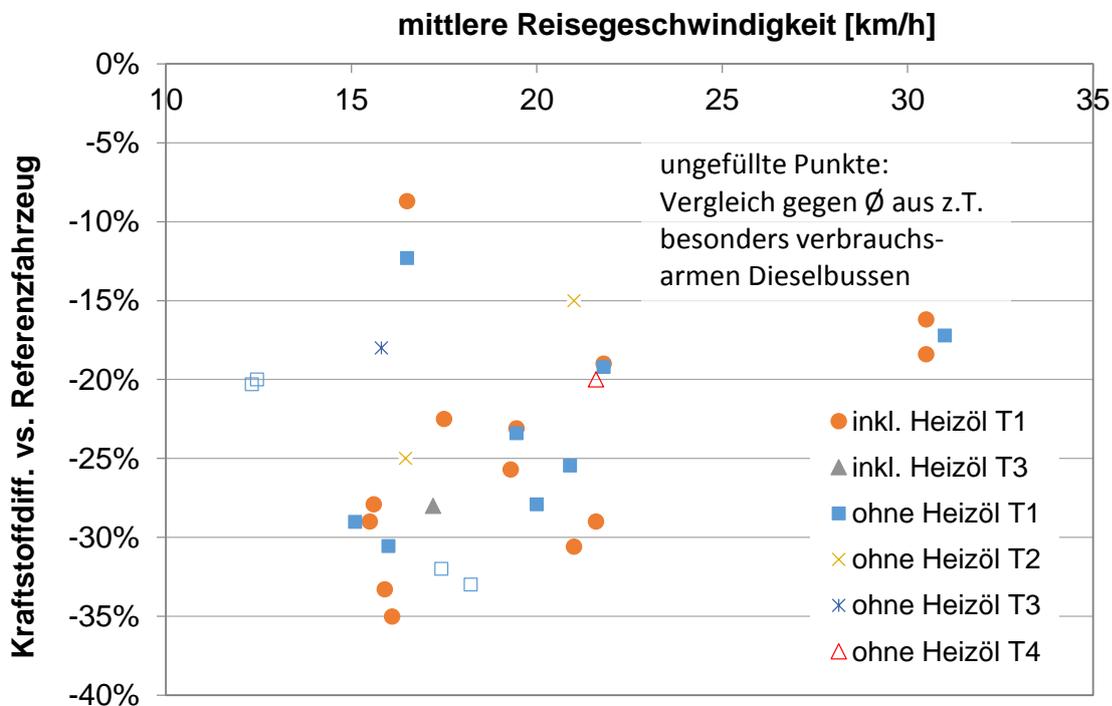
Abbildung 53: Auswirkung kritischer Steigungsstrecken auf die Kraftstoffeinsparungen



### Paralleler Hybridantrieb mit Batterie

Für Solobusse mit parallelem Hybridantrieb und Batterie liegen inzwischen ebenfalls Messdaten aus den Topographieklassen T3 und T4 vor. Daraus geht hervor, dass auch in diesen Fällen erhebliche Einsparungen erzielt werden können und diese nicht hinter denen aus T1 zurück stehen, so dass meist Einsparungen von 20% oder mehr erzielt werden.

Wie die Messwerte in Abbildung 55 zeigen, ist innerhalb der Topographieklassen T1 ein deutlicher Zusammenhang zwischen der mittleren Reisegeschwindigkeit und den Kraftstoffeinsparungen gegeben. Dabei ist es ohne Belang, ob der Verbrauch der Zusatzheizung einbezogen wurde oder nicht. Einzige Ausnahme bilden in den niedrigen Geschwindigkeitsbereichen die gegenüber besonders verbrauchsarmen Fahrzeugen gemessenen Werte und die Verbräuche der erst kurzzeitig eingesetzten Fahrzeuge, die in den Anfangsmonaten noch geringe Einsparungen zeigten.



**Abbildung 55: Relative Kraftstoffeinsparungen von Solobussen mit parallelem Hybridantrieb und Batterien**

in Abhängigkeit von der mittleren Reisegeschwindigkeit

### 7.1.3 Fazit

Die Hybridbuskonzepte der einzelnen Hersteller weisen unterschiedliche Ergebnisse bzgl. der Kraftstoffeinsparung gegenüber konventionellen Dieselbussen aus. Deutlich wird jedoch, dass Hybridbusse nur dann signifikante Kraftstoffeinsparungen erzielen können, wenn sie auf geeigneten Linien eingesetzt werden. Als Eignungskriterien lassen sich basierend auf den vorhandenen Daten die Topographie einer Linie sowie die auf ihr gefahrenen mittleren Reisegeschwindigkeiten benennen. Dabei überwiegt, mit Ausnahme der Parallelhybriden mit Batterie, der Einfluss der Topographie, speziell der Anteil längerer ununterbrochener Steigungs- und

Gefällestrecken mit stärkerer Neigung, sog. kritischer Steigungen. Demnach sollten Hybridbusse vorrangig auf Linien mit einem den Topographieklassen T1 und T2 entsprechenden Höhenprofil eingesetzt werden. Parallelhybridbusse mit Batterie können nach derzeitiger Datenlage auch auf topografisch anspruchsvollen Linien eingesetzt werden. Obwohl ein Zusammenhang zwischen Kraftstoffeinsparung und mittlerer Reisegeschwindigkeit mit Hilfe der Daten belegbar ist, ist der Einfluss der Reisegeschwindigkeit geringer als der Einfluss der Topographie zu bewerten.

Die Untersuchungen zeigen bei den älteren Fahrzeuggenerationen bzw. Überarbeitungsständen deutliche Unterschiede zwischen den Fahrzeuglängen. Während die seriellen und leistungsverzweigten Gelenkhybridbusse älterer Generation zumeist nur geringe bis mittlere Kraftstoffeinsparungen gegenüber konventionellen Dieseln auswiesen, waren und sind die Einsparungen durch Solohybridbusse signifikant. Ebenso zeigen die innerhalb des Projektes eingesetzten leistungsverzweigten Gelenkhybridbusse erhebliche Einsparungen. Hingegen bedürfen die bisher eingesetzten seriellen Gelenkhybridbusse noch einer Überarbeitung zur Optimierung des Kraftstoffbedarfes, nicht zuletzt auch im Zusammenhang mit dem jeweils implementierten Konzept zur Fahrgastraumheizung.

## **7.2 Analyse des Fahrereinflusses (VCDB , IVI)**

Um den Fahrereinfluss auf den Kraftstoffverbrauch bestimmen zu können, wurden die Verkehrsunternehmen befragt, inwieweit eine fahrerbezogene Erhebung des Kraftstoffverbrauchs möglich ist. In den Antworten wurde die parallele Aufzeichnung von Fahrer (bzw. Fahrergruppe) und Kraftstoffverbrauch von den beteiligten Verkehrsbetrieben als nicht realisierbar betrachtet.

Zum einen stellt eine derartige Erfassung personenbezogener bzw. personenbeziehbarer Daten einen mitbestimmungspflichtigen Sachverhalt dar. Die Verkehrsbetriebe erwarteten nicht, die Zustimmung der jeweiligen Arbeitnehmervertretung zu einer solchen Maßnahme zu erhalten.

Zum zweiten stehen betrieblich-organisatorische Gründe einer solchen Erfassung und Auswertung entgegen. In der Regel werden die Busse einmal täglich betankt. Die Fahrer und Fahrerinnen wechseln in diesem Zeitraum jedoch mehrmals. Da in den betrachteten Unternehmen die Fahrzeuge auch keinen Fahrergruppen zugeordnet sind, ist eine solche Auswertung nicht möglich.

Dementsprechend bestehen in den betrachteten Verkehrsunternehmen auch keine Anreiz- oder Prämiensysteme zum kraftstoffsparenden Fahren.

Um den Fahrereinfluss auf die Energieeffizienz zu untersuchen, muss deshalb auf die Angaben der Verkehrsunternehmen zur Schulungsstrategie und die Reflexion der tatsächlich ausgeführten Schulungen aus den Fahrerantworten zurückgegriffen werden.

### Strategien der Verkehrsunternehmen zur Fahrerschulung

Alle Verkehrsunternehmen schulen die Fahrer und Fahrerinnen entsprechend des Berufskraftfahrerqualifizierungsgesetzes. Diese Qualifizierung erhalten auch die anderen Personen mit Fahrberechtigung. Zusätzlich werden Schwerpunkte wie:

- Kundenorientiertes Verhalten,
- Deeskalation,
- Tarifauffrischung,
- Änderungen bei der StVO,
- Entspannung und Ernährung,
- Handhabung neuer Systeme (Bordrechner, Betriebsleitsystem),
- Kommunikation mit der Leitstelle und
- sonstige aktuell auftretende Themen

behandelt.

### Schulung für die Bedienung von Hybridbussen

Hier unterscheiden sich die Strategien der Verkehrsunternehmen stärker. Die Spanne reicht von einer ganztägigen Unterweisung mit Theorie und Praxis für den optimalen Einsatz von Hybridfahrzeugen bis zu einer kurzen Einweisung in das Fahrzeug durch ausgewählte Fahrer.

**Tabelle 21: Schulungsstrategien der Verkehrsunternehmen**

Verkehrsunternehmen	Schulungsstrategie für das Fahrpersonal
Stadtbus Ingolstadt GmbH	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Sicherheitsunterweisung für das Hochvolt-System</li> <li>– Tagesschulung durch den Hersteller mit Theorie und Praxis für den optimalen Einsatz von Hybridfahrzeugen</li> </ul>
Wolfsburger Verkehrs-GmbH	Theorie (ca. 1 - 1,5 h): <ul style="list-style-type: none"> <li>– Aufbau u. Funktion der Hybridtechnik</li> <li>– Fahrtechnik mit Hybridbussen</li> </ul> Praxis (ca. 1 h): <ul style="list-style-type: none"> <li>– Fahrzeugeinweisung und Fahrtraining</li> </ul>
Süderelbe Bus GmbH (SBG)	10 minütige Einweisung für das Fahrzeug durch dafür ausgewählte Fahrer, insbesondere Hinweis zur Hochvoltthematik und zur Abschaltautomatik
Friedr. Jasper Rund- und Gesellschaftsfahrten GmbH	10 minütige Einweisung für das Fahrzeug durch dafür ausgewählte Fahrer, insbesondere Hinweis zur Hochvoltthematik und zur Abschaltautomatik
Verkehrsbetriebe Hamburg-Holstein AG	1. Unterweisung aller Fahrer in die Bedienung des Hybridbusses mit Probefahrt. 2. Unterweisung aller Fahrer hinsichtlich der Besonderheiten und der wirtschaftlichen Fahrweise mit Hybridbussen.
üstra	2 Std. Unterweisung in Störungsbeseitigung und kraftstoffsparendes Fahren mit den Hybridbussen für alle Personen mit Fahrberechtigung

Die Fahrer bestätigten Dauer und Umfang der Hybridbus-Schulungen im Rahmen der Fragebogenaktion. Nur vereinzelt wurde angegeben, dass keine oder eine stark verkürzte Einweisung erfolgte.

Damit kann der Einfluss von Schulungen auf die Kraftstoffeffizienz nur zwischen den Betreibern gleichartiger Busse mit unterschiedlicher Schulungsintensität verglichen werden. Das sind zum einen die Hamburger Betriebe und zum anderen SBI und WVG. Die folgende Tabelle zeigt die durchschnittlichen Verbrauchsdaten bis August/September 2015. Daraus ist keine Zuordnung des Kraftstoffverbrauchs zur Schulungsintensität ableitbar. Zwar sind bei der SBI, welche die Fahrer ausgiebig unterwiesen hat, die Einsparungen sowohl prozentual als auch mengenmäßig größer, allerdings ist der Grundverbrauch der Dieselbusse sehr unterschiedlich. Ähnliches gilt für die Hamburger Betriebe. Hier betragen die Einsparungen bei VHH und Jasper über 10 l/100 km, obwohl die Fahrer bei Jasper nur kurz unterwiesen wurden. Bei gleicher Schulungszeit wurden von den SBG-Fahrzeugen nur knapp 7 l/100 km gespart. Auch hier ist allerdings der Grundverbrauch der Referenzbusse deutlich niedriger. Bei HHA sind die Fahrzeuge erst 9 Monate im Einsatz.

**Tabelle 22: Schulungsdauer und Kraftstoffeffizienz**

Verkehrsunternehmen	Schulungsdauer	Kraftstoffverbrauch Dieselbusse [l/100km]	Kraftstoffeinsparung Hybridbusse [l/100 km]	Kraftstoffeinsparungen Hybridbusse [%]
SBI	1 Tag	42,5	-11,9	-25,4%
WVG	1,5 – 2,5 Stunden	35,4	-7,0	-19,8%
SBG	10 Minuten	35,7	-6,6	-18,5%
Jasper	10 Minuten	44,8	-10,2	-22,8%
VHH *	0,5 – 1,5 Stunden	41,9	-11,2	-26,6%
HHA	15 – 30 Minuten	G: 56,8/ S: 37,9	G: -10,7/ S: -4,3	G: -18,8%/ S: -11,4%
üstra	2 Stunden	G: 55,7/ S: 37,7	G: -11,4/ S: -10,2	G: -20,5%/ S: -27,2%

\* In den Daten wurde kein Verbrauch von Heizediesel erfasst.  
S = Solobus; G=Gelenkbus

### 7.3 Lademöglichkeiten (IVI)

Plug-In-Hybridbusse sind erst seit Juli 2015 im geregelten Einsatz, so dass aus den bisherigen Einsatzerfahrungen noch keine allgemeingültigen Schlussfolgerungen gezogen werden können. Die Untersuchungen beschränken sich damit auf Grundlagen für den optimalen Einsatz von Plug-In-Hybridbussen.

Plug-In-Hybridbusse stellen einen Kompromiss zwischen reinen Hybridbussen und Batteriebusen dar, um insbesondere der Reichweitenproblematik von Batteriebusen zu begegnen. Dabei steht der Wunsch, rein elektrisch zu fahren, im Vordergrund.

Für Aussagen bzgl. der besten Einsatzbedingungen für Plug-In-Hybridbusse sind zunächst die Fahrzeugtechnologien zu betrachten, für die Plug-In-Hybridbusse als Alternative in Frage kommen. In den Untersuchungen wurden hierfür ausgewählt:

- konventionelle Dieselbusse
- Hybridbusse ohne Plug-In-Funktion
- Batteriebusse.

### 7.3.1 Vorgehensweise und Annahmen

Aussagen zu optimalen Einsatzmöglichkeiten lassen sich nur anhand von Vergleichen treffen. Aufgrund der für Plug-In-Hybridbusse notwendigen Ladeinfrastruktur und der eingeschränkten elektrischen Reichweite sind die Ergebnisse abhängig von der Linienlänge und der Anzahl der darauf betriebenen Fahrzeuge. Daher wurden die Untersuchungen für verschiedene Kombinationen aus Linienlänge und Fahrzeuganzahl durchgeführt. Dabei wurde von einem 10-Minuten-Takt ausgegangen. Des Weiteren musste die Wendezeit an einer Endhaltestelle gleich oder kleiner der Taktzeit sein, da ansonsten bei Nachladevorgängen bereits gemäß Fahrplan mit gegenseitigen Behinderungen zu rechnen bzw. mehr als eine Nachlademöglichkeit vorzusehen wäre. Das gleiche Laderegime wurde für die Batteriebusse angesetzt. Als Reisegeschwindigkeit zwischen den Endhaltestellen wurde einheitlich 17 km/h angesetzt.

Naturgemäß bestehen noch eine Reihe weiterer Einflussgrößen, für die verschiedene Annahmen getroffen werden können. Hierzu gehören z.B.

- die Beschaffungskosten für Fahrzeuge, Batterien und Infrastruktur,
- der Zinssatz,
- die Nutzungsdauer von Fahrzeugen, Batterien und Ladeinfrastruktur,
- Verbrauchswerte pro Kilometer sowie
- die Energie- und Dieselkosten,

für die jeweils unterschiedliche Annahmen getroffen werden müssen. Eine detaillierte Darstellung mit unterschiedlichen Werten für die variablen Eingangsgrößen würde jedoch zu einer Vielzahl von Ergebnissen führen, die im Nachgang nicht übersichtlich darstellbar wären. Umfangreiche Vergleichsrechnungen und durchgeführte Sensitivitätsanalysen empfehlen, in der Darstellung neben den Variationen hinsichtlich Linienlänge und Fahrzeuganzahl nur den Dieselpreis und die Kosten für Batteriebusse in jeweils zwei Varianten zu betrachten. Alle Annahmen für die Berechnungen für 12 m Solofahrzeuge sind Tabelle 23 zu entnehmen. Dabei wurden die verwendeten Werte zu z.B. Kraftstoff- und Fahrzeugpreisen und Zinssatz mit den Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen in Kapitel 6.2.1 abgestimmt.

Grundsätzlich muss darauf hingewiesen werden, dass Dieselbusse technisch etablierte Systeme darstellen, die in großen Stückzahlen gefertigt werden und deshalb relativ niedrige, nur schwach variierende Kosten aufweisen.

Demgegenüber befinden sich Plug-In-Hybridbusse und Batteriebusse gerade in der Erprobungs- und Einführungsphase. Das Gleiche gilt für deren Ladeinfrastruktur und die damit realisierten Ladeverfahren und Ladestrategien. Dementsprechend streuen die Kostenangaben aus den in Umsetzung befindlichen Projekten sehr weit. Bei stärkerer Marktdurchdringung und

in Abhängigkeit von der Entwicklung der elektrischen Speichersysteme sind Kostensenkungen zu erwarten. Diese kann zum jetzigen Zeitpunkt noch nicht näher beziffert werden.

**Tabelle 23: Getroffene Annahmen**

Eingangsgrößen (für Solofahrzeuge)	Dieselmibus	Hybridbus	Plug-In- Hybridbus	Batteriebus
Beschaffungskosten Busse	225 000 €	310 000 €	430 000 €	B1: 540 000 € B2: 340 000 €
Beschaffungskosten Batterie	-	gemietet	gemietet	160 000 €
Batteriemiete	-	4 800 €	14 400 €	
Beschaffungskosten Ladeinfrastruktur (2 Ladestationen inkl. Netzanschluss)	-	-	540 000 €	540 000 €
Zinssatz	2 %			
Nutzungsdauer Busse	12 Jahre	12 Jahre	12 Jahre	15 Jahre
Nutzungsdauer Energiespeicher	-	-	-	7,5 Jahre
Nutzungsdauer Ladeinfrastruktur	-	-	20 Jahre	20 Jahre
Rein elektrische Fahrweite	-	-	6 km	gemäß Linienlänge
Dieserverbrauch pro km	0,4 l / km	0,3 l / km	0,3 l / km <sup>1)</sup>	-
Elektroenergieverbrauch pro km	-	-	1,3 kWh / km	1,3 kWh / km
Dieselpreis	0,97 / 1,50 € / l			
Preis für Elektroenergie	0,16 € / kWh			
<sup>1)</sup> Verbrauch nach Nutzung der nachgeladenen elektrischen Energie				

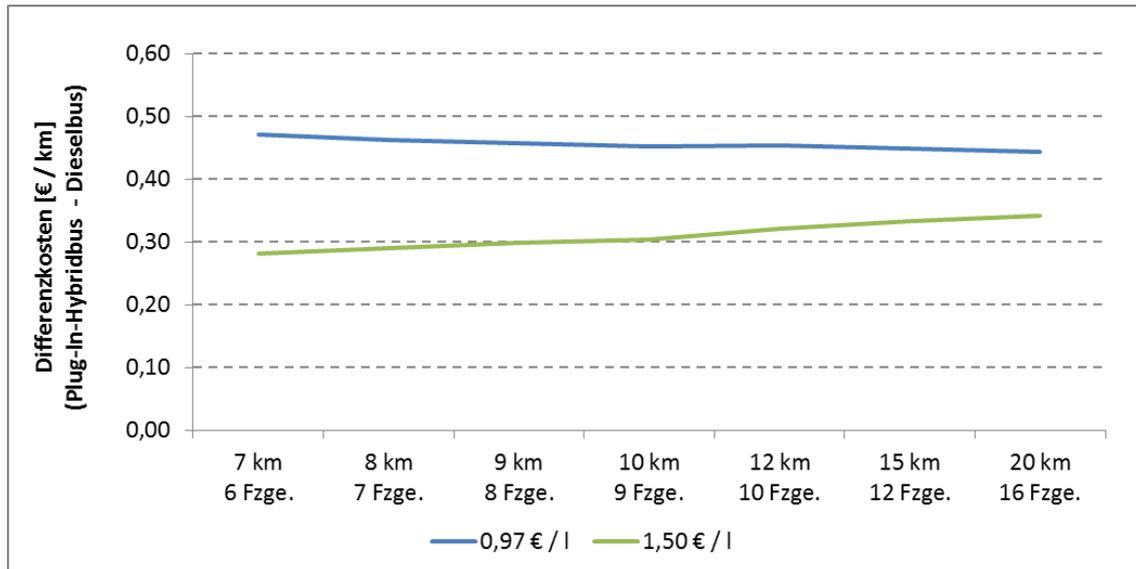
Für die Wartungs- und Instandhaltungskosten wurden zwischen den Fahrzeugtypen vereinfachend keine Unterschiede angesetzt. Für die Ladeinfrastruktur wurden jährliche Kosten für Wartung und Instandhaltung in Höhe von 2,5 % der Beschaffungskosten angesetzt.

### 7.3.2 Vergleich mit konventionellen Dieselmussen

Im Vergleich mit konventionellen Dieselmussen haben Plug-In-Hybridbusse den Vorteil, zielgerichtet auf ausgewählten Streckenabschnitten rein elektrischen Busbetrieb durchführen zu können. Dadurch können sensible Bereiche, vor allem in den immissionsbelasteten Innenstädten emissionsfrei durchfahren werden. Weiterhin verringern Plug-In-Hybridbusse die Abhängigkeit von fossilen Brennstoffen.

Wie die Ergebnisse in Abbildung 56 jedoch zeigen, ist der Betrieb von Plug-In-Hybridbussen im Vergleich mit konventionellen Dieselmussen bei dem derzeitigen bzw. mittelfristig zu erwar-

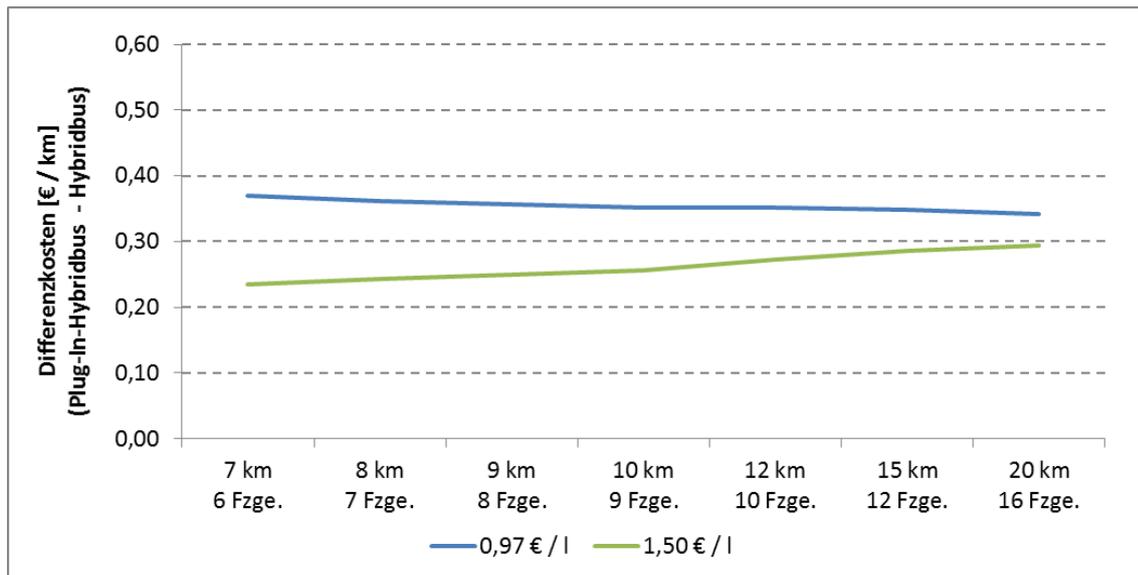
tenden Dieselpreisbereich mit höheren Kosten verbunden. Erst ab einem Dieselpreis der wesentlich über dem heutigen Niveau liegt und bei gleichzeitigem Absinken der Beschaffungskosten für Plug-In-Hybridbusse und der dafür notwendigen Ladeinfrastruktur, kann deren Betrieb aus wirtschaftlicher Sicht wettbewerbsfähig zum Betrieb von Dieselnbussen werden. Dies gilt für relativ kurze Linien etwas eher, da dort der Anteil der elektrischen Fahrweite und der damit verbundenen niedrigeren Betriebskosten größer ist.



**Abbildung 56: Differenzkosten pro Fahrzeugkilometer zwischen Plug-In-Hybridbussen und konventionellen Dieselnbussen**  
für verschiedene Kombinationen aus Linienlänge und Fahrzeuganzahl

### 7.3.3 Vergleich mit Hybridbussen

Im Vergleich mit Hybridbussen ist der Betrieb von Plug-In-Hybridbussen unter den getroffenen Annahmen bei derzeitigen und mittelfristig zu erwartenden Kraftstoffkosten mit keinen Kostenvorteilen verbunden (siehe Abbildung 57). Nur bei deutlich höheren Kraftstoffpreisen und gleichzeitig starkem Absinken der Beschaffungskostendifferenz zwischen Hybridbussen und Plug-In-Hybridbussen (inkl. Ladeinfrastruktur) können auf kurzen, vorrangig elektrisch befahrbaren Strecken wirtschaftliche Vorteile erzielbar sein. Als Alternative zu Hybridbussen sind Plug-In-Hybridbusse daher nur unter Beachtung des rein elektrischen Fahrbetriebs und der damit verbundenen lokalen Emissionsvermeidung anzusehen.

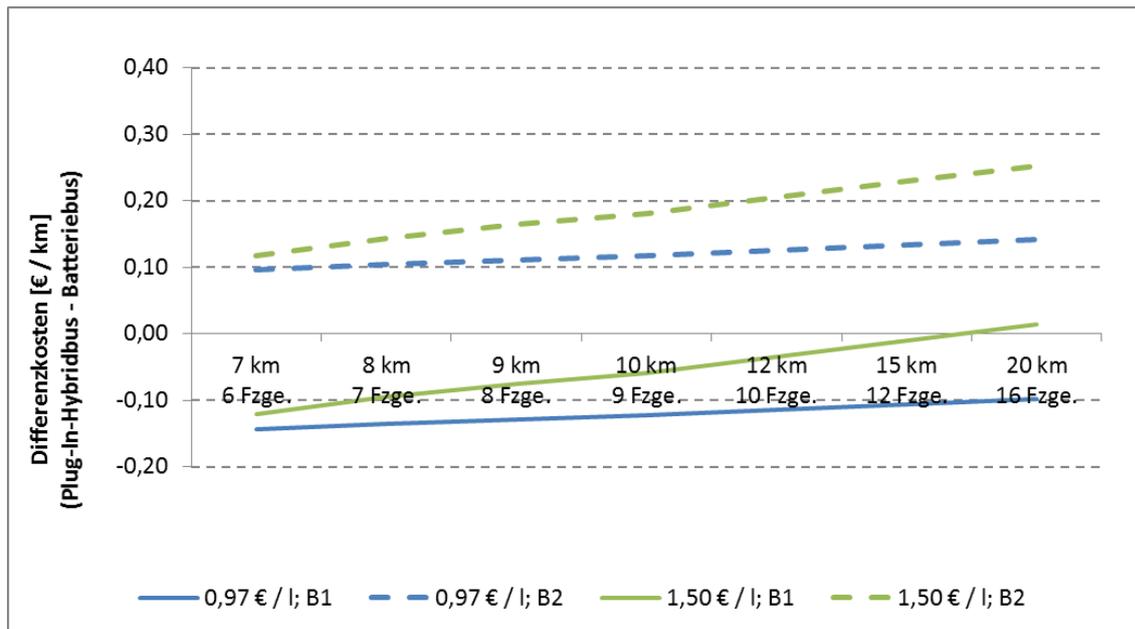


**Abbildung 57: Differenzkosten pro Fahrzeugkilometer zwischen Plug-In-Hybridbussen und Hybridbussen**  
für verschiedene Kombinationen aus Linienlänge und Fahrzeuganzahl

### 7.3.4 Vergleich mit Batteriebusen

Mit Batteriebusen können bereits heute viele Linien betrieben werden. Liegen die Dienst- bzw. Umlauflängen jedoch deutlich über 200 km pro Tag, ist eine Nachladung im Betrieb an den Endhaltestellen (Gelegenheitsladung) notwendig. In zahlreichen durch das Fraunhofer IVI durchgeführten Untersuchungen hat sich gezeigt, dass Linien mit Nachladung im Betrieb mit Batteriebusen betrieben werden können, sofern ein bestimmtes Verhältnis zwischen Fahrweite, Fahrzeit und Wendezeit eingehalten wird und die Linie nicht extrem verspätungsanfällig ist. Als Anhaltspunkt kann gelten, dass die reale Wendezeit in etwa 1/6 der Fahrzeit betragen muss, da nur so sichergestellt ist, dass den Bussen ausreichende Ladezeiten zur Verfügung stehen.

Plug-In-Hybridbusse sind von daher insbesondere auf solchen Linien eine Alternative zu Batteriebusen, auf denen die genannten Randbedingungen nicht erfüllt werden und das sog. Reichweitenproblem von Batteriebusen kurz- bis mittelfristig nicht oder nur unter Einsatz zusätzlicher Fahrzeuge im Umlauf gelöst werden kann.



**Abbildung 58: Differenzkosten pro Fahrzeugkilometer zwischen Plug-In-Hybridbussen und Batteriebussen**  
für verschiedene Kombinationen aus Linienlänge und Fahrzeuganzahl

Wie die Ergebnisse in Abbildung 58 zeigen, weisen Plug-In-Hybridbusse unter den getroffenen Annahmen bei derzeitigen und mittelfristigen Kraftstoffpreisen und einem hohen Preisniveau für Batteriebusse (B1) Kostenvorteile auf. Diese Vorteile sinken mit dem Anwachsen der Fahrtanteile im Dieselbetrieb und mit dem Ansteigen der Kraftstoffpreise. Bei einem niedrigen Preisniveau der Batteriebusse (B2) stellt sich unter den o. g. Bedingungen deren Betrieb bereits als wirtschaftlicher dar.

### 7.3.5 Fazit

Gegenüber Dieselnbussen stellen Plug-In-Hybridbusse kurz- bis mittelfristig aus finanzieller Hinsicht keine Alternative dar. Dasselbe gilt für den Vergleich mit Hybridbussen. Sollen die unbestrittenen Vorteile aus Sicht der Umwelt sowie der zu vermindernden Abhängigkeit von fossilen Brennstoffen genutzt werden, sind entsprechende finanzielle Anreize für Verkehrsunternehmen notwendig. Alle hier gezeigten Kostenvergleiche wurden für alle Bussysteme ohne jegliche Förderung bei Beschaffung oder Betrieb berechnet.

Gegenüber Batteriebussen weisen Plug-In-Hybridbusse bei heutigen Kraftstoffkosten und einem hohen Preisniveau der Batteriebusse wirtschaftliche Vorteile auf, besonders dann, wenn sie auf Linien eingesetzt werden, die vorrangig elektrisch befahren werden können. Verringert sich die Preisdifferenz zwischen Plug-In-Hybridbussen und Batteriebussen bzw. steigen die Kraftstoffkosten an, sind Batteriebusse unter den getroffenen Annahmen wirtschaftlicher zu betreiben.

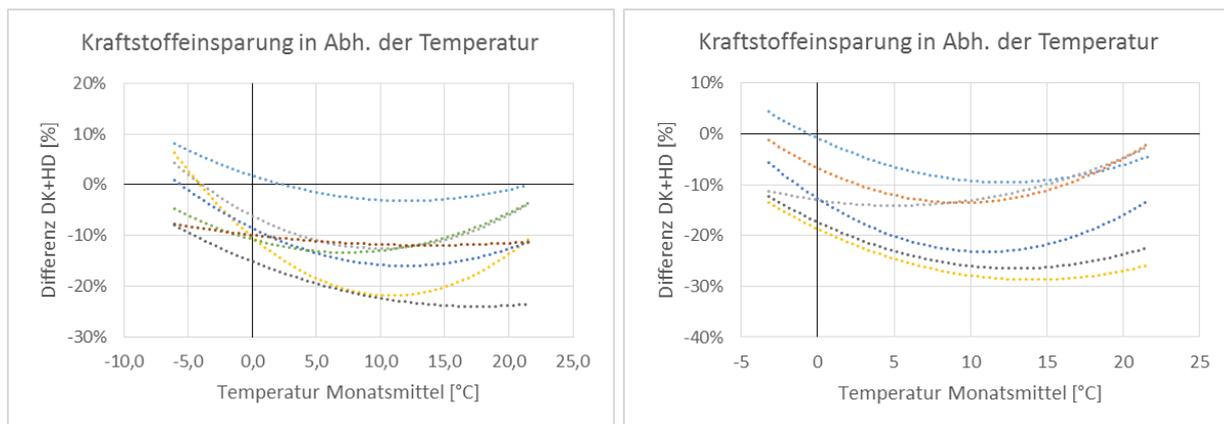
Grundsätzlich sind Plug-In-Hybridbusse sowohl hinsichtlich der Kosten als auch der Umweltwirkung für eher kurze Linien geeignet, da hier das Verhältnis von Linienlänge und rein elektrischer Fahrweite am günstigsten ist.

## 7.4 Klimatische Bedingungen (IVI/thinkstep)

Zu den Kraftstoffverbrauchsdaten der Datenbank wurden zusätzlich die monatlichen Temperaturwerte (Durchschnitt, Maxima und Minima) sowie die Anzahl meteorologischer Kenntage (Eis-, Frost- und Sommertage sowie heiße Tage) erhoben (Datenquelle: DWD).

Vergleiche der Kraftstoffverbrauchsdaten sowohl mit den oben aufgeführten Temperaturdaten als auch den monatlichen Gradtagen (Summe der Differenzen zu einem bestimmten Temperaturniveau) zeigten, dass anhand der monatlichen Temperaturmittelwerte der Zusammenhang mit dem Kraftstoffverbrauch am besten dargestellt werden kann. Wie die nachfolgenden Kurven für die Kraftstoffeinsparungen verschiedener Linien zeigen, werden die höchsten Einsparungen bei mittleren Temperaturen erzielt. Hingegen führen tiefe und hohe Temperaturen zu einer Minderung der Einsparungen.

In Abbildung 59 sind aus Übersichtsgründen in zwei Diagrammen Verbrauchsdifferenzen für Solobusse mit seriellem Hybridantrieb gegenüber Dieselnissen von insgesamt 12 Linien dargestellt. Bei den Kurven handelt es sich, wie in den weiteren Diagrammen auch, um polynomische Trendlinien, die durch eine Vielzahl von Einzelmesswerten gelegt wurden. Diese wurden aus Übersichtsgründen nicht mit dargestellt.

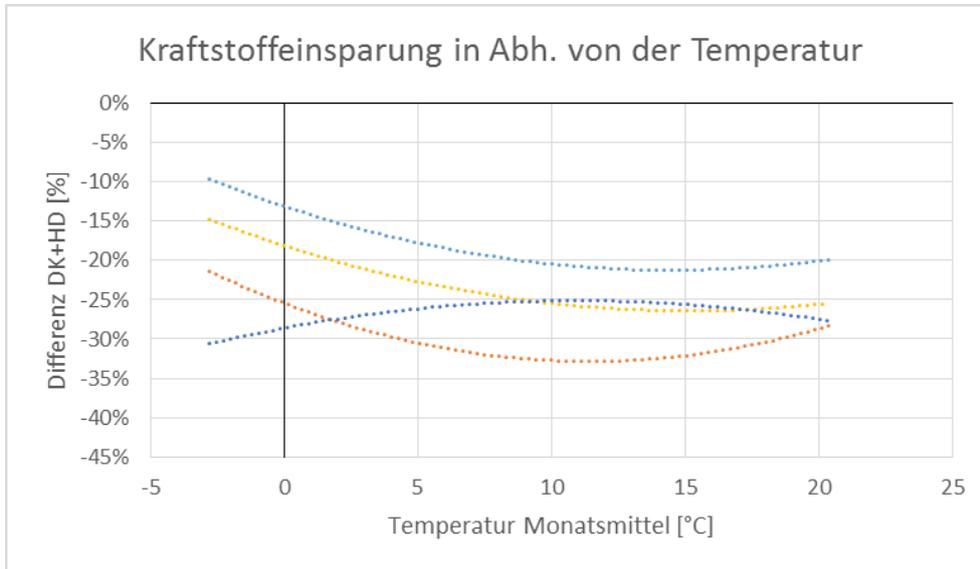


**Abbildung 59: Relative Kraftstoffeinsparungen von Solobussen mit seriellem Hybridantrieb und Superkondensatoren (verschiedene Linien) in Abhängigkeit von der mittleren Monatstemperatur**

Wenn auch in unterschiedlicher Ausprägung weisen alle Messreihen den gleichen qualitativen Verlauf aus. Die Einsparungen sind am größten bei moderaten Außentemperaturen, wohingegen die Einsparungen durch den Heizungsbetrieb gemindert bzw. z. T. auch vollständig aufgehoben werden. In ähnlicher Weise, wenn auch nicht so stark, wirkt sich der Betrieb der Klimaanlage aus.

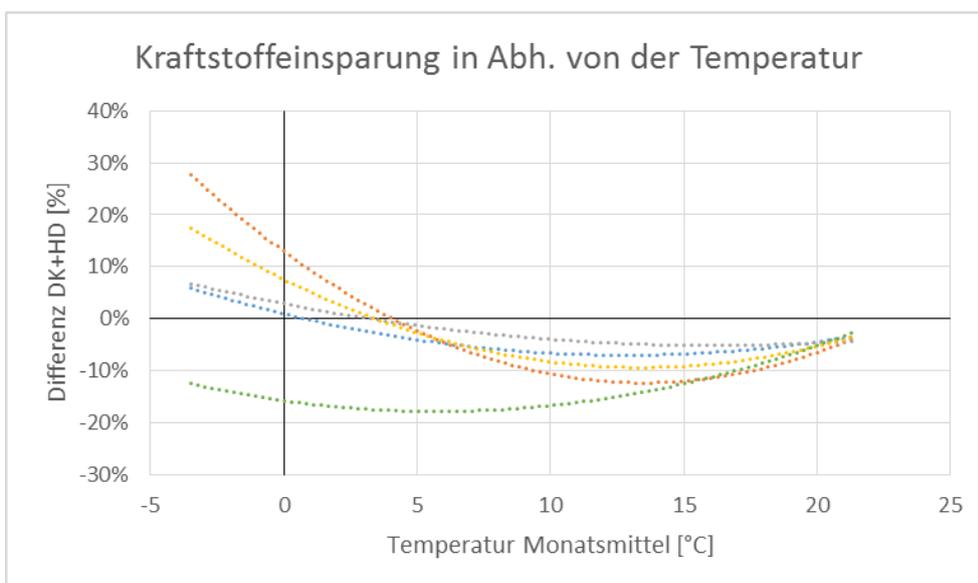
Einen ähnlichen, teilweise stärker oder schwächer ausgeprägten Verlauf zeigen die relativen Kraftstoffeinsparungen von Solobussen mit parallelem Hybridantrieb und Batterien in Abbildung 60. Bei genauerer Analyse des kilometerbezogenen Heizölverbrauchs zeigte sich, dass dieser bei Fahrzeugen, die im gleichen Gebiet und damit bei gleichen Außentemperaturen verkehrten, jedoch von anderen Verkehrsunternehmen betrieben wurden, teilweise starke Unterschiede aufwies. Diese Unterschiede traten sowohl bei den Hybridbussen als auch bei den

Referenzbussen der jeweiligen Unternehmen auf. Mögliche Ursachen können in der Einsatzcharakteristik liegen. Häufige Haltestellenstopps und längere Haltestellenaufenthalte könnten in diesem Fall zu einem erhöhten Heizölbedarf geführt haben.



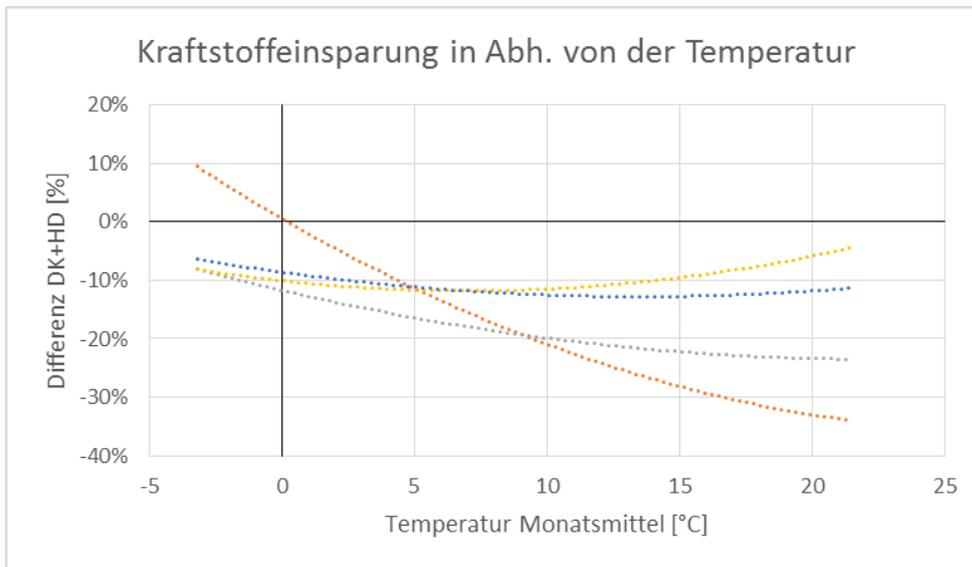
**Abbildung 60:** Relative Kraftstoffeinsparungen von Solobussen mit parallelem Hybridantrieb und Batterien in Abhängigkeit von der mittleren Monatstemperatur

Die Aussagen bzgl. der Abhängigkeit der Kraftstoffeinsparungen von den Außentemperaturen gelten in gleicher Weise für Gelenkbusse, was die Linienverläufe in Abbildung 61 und Abbildung 62 für serielle und leistungsverzweigte Hybridantriebe beispielhaft belegen. Gerade bei niedrigen Temperaturen werden bei den Gelenkbussen mit seriellem Hybridantrieb aufgrund des aktuell eingesetzten Heizungskonzepts für den Fahrgastraum mit Zusatzheizgeräten die Kraftstoffstoffsparungen teilweise überkompensiert.



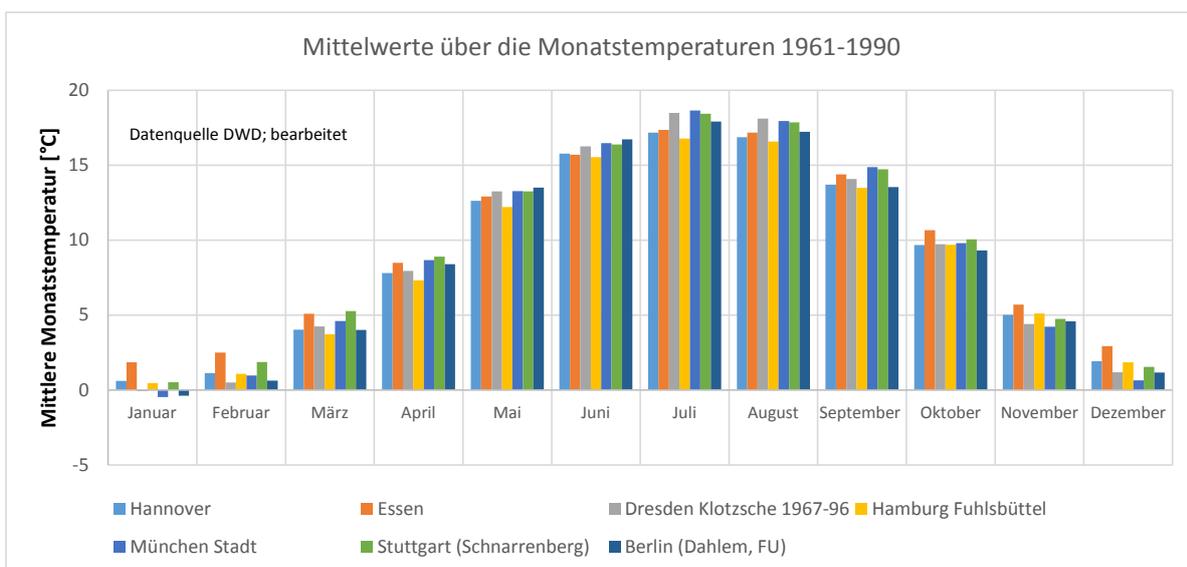
**Abbildung 61:** Relative Kraftstoffeinsparungen von Gelenkbussen mit seriellem Hybridantrieb und Batterien

in Abhängigkeit von der mittleren Monatstemperatur



**Abbildung 62: Relative Kraftstoffeinsparungen von Gelenkbussen mit leistungsverzweigtem Hybridantrieb und Batterien in Abhängigkeit von der mittleren Monatstemperatur**

Um die Auswirkungen der Temperaturabhängigkeit zwischen deutschen Städten zumindest grob bewerten zu können, wurden für verschiedene Messstationen die mittleren Monatstemperaturwerte der letzten Jahrzehnte ermittelt und vergleichend einander gegenübergestellt (siehe Abbildung 63). In den Wintermonaten beträgt der maximale Unterschied in etwa zwei bis drei Kelvin, was in Abhängigkeit von der Hybridtechnologie und Linie zu Mehr- bzw. Mindereinsparungen von etwa 5 %-Punkten führen kann. Über das gesamte Jahr hinweg werden diese Unterschiede jedoch wieder weitgehend ausgeglichen, insbesondere dann, wenn der Bus nicht mit einer Klimaanlage ausgestattet ist.



**Abbildung 63: Mittelwerte über die Monatstemperaturen in verschiedenen deutschen Städten**

Insofern ist einzuschätzen, dass der Einfluss der Streckencharakteristik auf die Kraftstoffeinsparungen die Auswirkungen unterschiedlicher klimatischer Bedingungen innerhalb von Deutschland bei weitem übersteigt. Lediglich für höher gelegene Städte, in denen noch dazu eine anspruchsvollere Topographie zu erwarten ist, überlagern sich die Effekte, wodurch solche Städte nicht unmittelbar für einen Einsatz von Hybridbussen prädestiniert sind.

## 8 Erstellung eines Softwaretools zur Beschaffungsoptimierung von Nahverkehrsbussen (AP4)

### 8.1 Zielsetzung und Vorgehensweise (TÜV)

Ziel dieses Arbeitspakets ist es, die im Rahmen des Projekts gesammelten Daten in einfacher Art und Weise für Verkehrsunternehmen und andere interessierte Gruppen verfügbar zu machen, um auf Basis der ermittelten Daten einen Vergleich unterschiedlicher Antriebstechnologien zu ermöglichen. Die Ergebnisse des Tools sollen keine Kaufempfehlung für Verkehrsunternehmen suggerieren.

Hierzu wurden die Daten aus AP1 und AP3 auf Basis von Microsoft-Excel in Kombination mit einer Bedienoberfläche miteinander verknüpft. Die Ergebnisse der Berechnung auf Basis definierter, einsatzspezifischer Charakteristika werden in Form eines Ergebnisberichts für den Nutzer des Tools zusammengefasst dargestellt. Die wesentlichen Parameter und der Aufbau des Tools werden im Folgenden kurz beschrieben.

### 8.2 Tooldesign und Dateninput (TÜV, BbA, thinkstep)

Um die Bedienung des Softwaretools möglichst einfach zu halten, werden die vom Anwender auszufüllenden Eingabefelder farblich hervorgehoben. Anhand der zum Berichtszeitpunkt vorliegenden Daten aus AP 1 und AP 3 wurden die folgenden Eingabeparameter definiert:

- Unternehmens- und Liniendaten
  - Unternehmenstitel & Linienbezeichnung
  - Bustyp (Solo- oder Gelenkbus)
- Streckencharakteristik
  - mittlere Reisegeschwindigkeit im Betrieb und Topographie in Form von Klassen (Definition der Topographieklassen siehe Kapitel 7.1.1.2)
- Fahrzeugspezifische Größen
  - Jahresfahrleistung (40.000, 60.000 oder 80.000 km/Jahr)
  - Wahl der Referenz bzw. benutzerdefiniertem Bus.
  - Auswahlmöglichkeit bei Einbringung des AdBlue und Heizdieserverbrauch
- Kostenspezifische Größen
  - Kosten pro Liter Diesel
  - Preissteigerung Diesel („keine“, „ähnlich dem der letzten 20 Jahre“, „benutzerdefiniert [%/Jahr]“)
  - Hybridförderung (als fixer Förderbetrag oder % der Hybridbezogenen Mehrkosten)
  - Anschaffungskosten des Referenzfahrzeuges
- Gewichtungsfaktoren (zur Priorisierung einzelner Charakteristika, Werte von 1-5)

Um die Anzahl der als Datensatz zu hinterlegenden Informationen zu reduzieren und die Möglichkeiten einer Fehlbedienung zu vermeiden, wird bei vielen Eingabefeldern mit Hilfe von

„Drop-Down“-Menüs die Auswahl auf zuvor definierte Werte begrenzt. Zudem werden alle Eingabefelder (mit Ausnahme der Unternehmens- und Linienbezeichnung und der Streckencharakteristik) beim Start des Tools mit Standardwerten belegt.

Abbildung 64 zeigt einen aktuellen Ausschnitt der Eingabemaske.

Eingabe	
<b>Unternehmens- und Linienbezeichnung</b>	
Unternehmenstitel	Verkehrsbetriebe Musterstadt
Linienbezeichnung	777
Datum der Analyse	01.02.2016
Datensatz vom:	10.11.2015
<b>Fahrzeugspezifische Größen der Referenz</b>	
Fahrzeugtyp	Solobus (~12m)
Jahresfahrleistung / Fahrzeug [km]	60.000
Referenzbus	Referenz
Verbrauch Referenzbus [l/100km]	42
<input checked="" type="radio"/> mit AdBlue Verbrauch <input type="radio"/> ohne AdBlue Verbrauch	
Elektrifizierungsgrad	beliebig
Anschaffungskosten [€]	
Heizdieselverbrauch	<input checked="" type="radio"/> mit <input type="radio"/> ohne
<b>Strecken- / Netzcharakteristik</b>	
<b>Streckencharakteristik</b>	
Geschwindigkeitsklasse [km/h]	>15<=20
Anteil kritischer Steigungen	T1
<a href="#">Hilfe</a>	
<b>Kosten</b>	
Liter Diesel [€/l]	1
kWh Strom (für PlugIn) [€/kWh]	0,18
Preissteigerung Kraftstoff	benutzerdefiniert
Förderung	35 [%]
<input type="radio"/> Fixe Förderung	10000 [€]
<input checked="" type="radio"/> % der Hybridmehrkosten	<input type="radio"/> Beide Förderungen
Teuerungsrate [%/Jahr]	2
<b>Gewichtungsfaktoren</b>	
<b>Gewichtung einzelner Eigenschaften:</b> ganzzahlige Werte von 1 (unwichtig) bis 5 (wichtig)	
Energieeffizienz	4
Gesamtkosten	3
elektrische Reichweite	1
Geräuschemission	1
Abgasemission	
Fahrbarkeit	
<a href="#">Auswerten</a>	

**Abbildung 64: Eingabemaske des Softwaretools**

Die Werte in allen Eingabefeldern werden vor der Auswertung auf Plausibilität und Vollständigkeit geprüft und nach erfolgter Auswertung ergänzend zur Empfehlung für eine Antriebstechnologie dargestellt.

Die Auswertung erfolgt anhand der Eingabegrößen, aus welchen sich mit Hilfe der Datensätze aus AP 1 und AP 3 antriebstypologienspezifische Kenngrößen einzelner Eigenschaften ergeben. Diese werden anhand der zuvor festgelegten Gewichtungsfaktoren bewertet, so dass sich für jeden Antriebstyp und auch für das Referenzfahrzeug eine Bewertungsgröße ergibt. Anhand dieser werden die Hybridvarianten und das Referenzfahrzeug untereinander verglichen und eine Empfehlung für eine Variante ausgesprochen. Diese wird auf der Ergebnisseite im Vergleich zum Referenzfahrzeug dargestellt. Es werden keine absoluten Zahlen genannt, sondern lediglich vergleichende Kennwerte.

Auf der Ergebnisseite befindet sich keine direkte Interaktionsmöglichkeit durch den Anwender mit Ausnahme eines Bedienfeldes, welches zurück zu Eingabemaske führt. Hierbei werden die zuvor gewählten Einstellungen beibehalten und Änderungen an den Eingabeparametern ermöglicht.

Es wurden Datensätze für die folgenden Konzepte hinterlegt:

- Parallelhybride mit Batterie
  - (Kapazitäten kleiner und größer als 5 kWh) (Solo- und Gelenkbusse)
- Leistungsverzweigte Hybride (Gelenkbusse)
- Serielle Hybride:
  - Batterie (Gelenkbusse)
  - Supercap (Solobusse)
- Konventionelle Busse (Solo- und Gelenkbusse)

Die Ergebnisübersicht erfolgt auf Basis definierter Kenngrößen in Form von Tabellen und Grafiken vgl. Abbildung 65 und Abbildung 66.

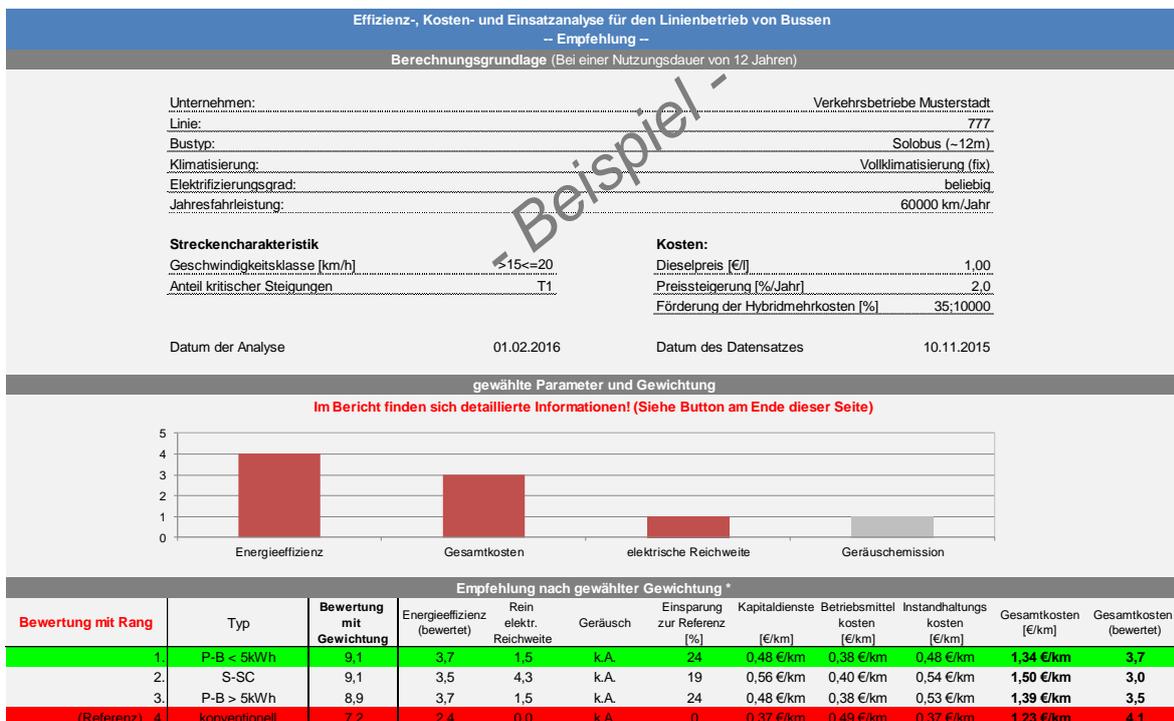
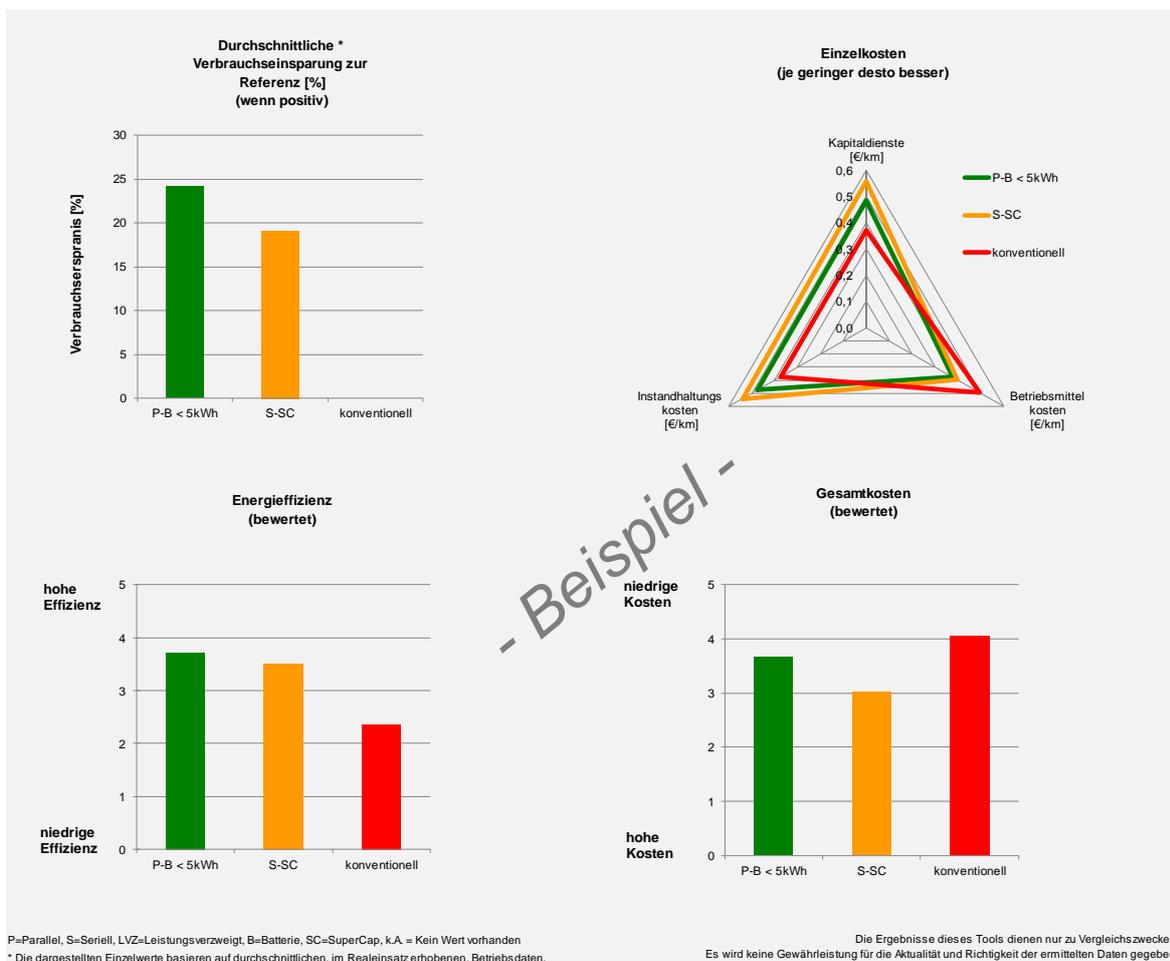


Abbildung 65: Ergebnisüberblick



**Abbildung 66: Ergebnisdarstellung**

Neben der Ergebnisdarstellung besteht die Möglichkeit, einen vollständigen Ergebnisbericht inkl. Hintergrundinformationen zu den genutzten Daten und Berechnungsgrundlagen zu drucken bzw. exportieren, vgl. Abbildung 67.

**Haftungsausschluss:**

Wir weisen darauf hin, dass die von diesem Tool kalkulierten Ergebnisse auf Messdaten beruhen, die uns von Dritten zur Verfügung gestellt werden und für deren Aktualität, Korrektheit, Vollständigkeit oder Qualität wir keinerlei Gewähr übernehmen. Somit übernehmen wir auch keine Haftung für die Richtigkeit, technische Brauchbarkeit und kaufmännische Verwertbarkeit der kalkulierten Ergebnisse.

**Effizienz-, Kosten- und Einsatzanalyse für den Linienbetrieb von Bussen  
-Empfehlungsbericht-**

Datum: 01.02.2016

Verkehrsbetrieb: Verkehrsbetriebe Musterstadt  
Linie: 777

**Referenzfahrzeug**

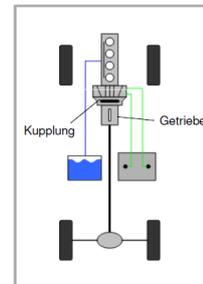
Fahrzeuglänge: Solobus (~12m)  
Abgasemissionsstandard: konventionell  
Antriebskonzept: konventionell  
Heizdieselverbrauch: ja

**Berechnungsgrunddaten**

Datum des Datensatzes: 10.11.2015

**Konzeptempfehlung:** Dieselhybrid (parallel)

Speicherart: Lithium-Ionen-Akkuzellen  
Speichergröße: max. 5kWh



**Detaillierte Empfehlungsdarstellung:**

**Streckendaten:**

Geschwindigkeitsklasse [km/h]:	>15<=20
Topographiekategorie:	T1

**Einordnung:**

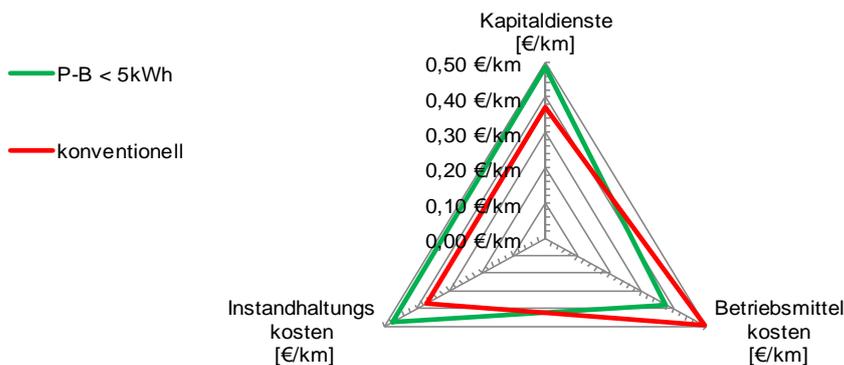
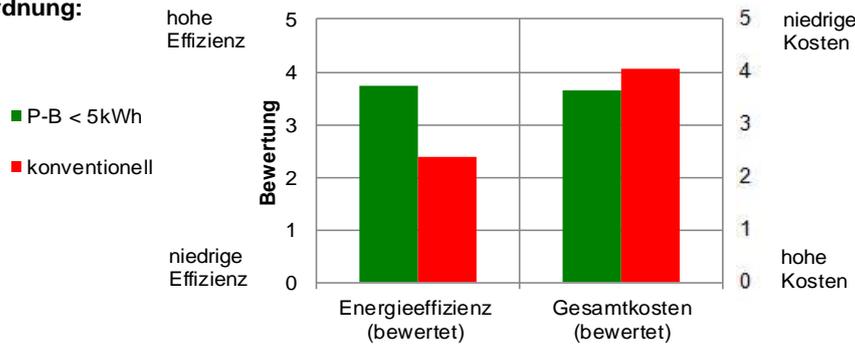


Abbildung 67: Ausschnitt Bericht Seite 1

Typ	Bewertung mit Gewichtung	Energieeffizienz (bewertet)	Rein elektr. Reichweite	Geräusch	Einsparung zur Referenz [%]
P-B < 5kWh	9,1	3,7	1,5	k.A.	24,2
S-SC	9,1	3,5	4,3	k.A.	19,2
P-B > 5kWh	8,9	3,7	1,5	k.A.	24,2
konventionell	7,2	2,4	0,0	k.A.	0,0

Typ	Kapitaldienste [€/km]	Betriebsmittel kosten [€/km]	Instandhaltungs kosten [€/km]	Gesamtkosten [€/km]	Gesamtkosten (bewertet)
P-B < 5kWh	0,48	0,38	0,48	1,34	3,66
S-SC	0,56	0,40	0,54	1,50	3,02
P-B > 5kWh	0,48	0,38	0,53	1,39	3,46
konventionell	0,37	0,49	0,37	1,23	4,06

**Gewichtung:**

Energieeffizienz	Gesamtkosten	elektrische Reichweite
4	3	1

**Kategoriezuteilungen**

Bewertung	Verbrauch Solo [l/100km]	Verbrauch Gelenk [l/100km]	Gesamtkosten Solo [€/km]	Gesamtkosten Gelenk [€/km]	Zeitanteil Elektrisches Fahren [%]
1	50	60	2	2,5	10
2	45	55	1,75	2,2	20
3	40	50	1,5	1,9	30
4	30	45	1,25	1,6	40
5	25	40	1	1,3	50

**Auflistung der Einzelkosten**

Dieselpreis [€/l]	1,00
Preissteigerung [%/Jahr]	2,00
Dieselpreis im 12. Jahr [€]	1,24
Förderung der Hybridmehrkosten [%]	35;10000

**Hybridmehrkosten (ohne Förderung) [€]**

P-B < 5kWh	90.000
S-SC	162.000
P-B > 5kWh	90.000
konventionell	-

**Fahrzeugarten**

Unterschieden wird bei derzeitigen Programmstand zwischen parallelen, seriellen und leistungsverzweigten Hybriden, diese werden mit der Referenz verglichen. Die Abkürzung sind wie folgt: P=Parallel, S=Seriiell, LVZ=leistungsverzweigt, B=Batterie, SC=Supercaps und FC=Fuel Cell. Die Batteriegröße steht jeweils hinter den Namen des Konzepts. Es wird grundsätzlich von einer Vollklimatisierung ausgegangen.

**Bewertungskriterien**

Die Bewertung der Empfehlung ist eine Kennzahl. Sie setzt sich aus der Betriebsdatenerfassung und den Technischen Daten der Modelle zusammen. Diese sind kategorisiert von "1" (=ungenügend) bis "5" (=vorteilhaft). Die Gesamtbewertung ist aufgrund des größeren Spektrums der Gewichtungen eine

**Abbildung 68: Ausschnitt Bericht Seite 2**

### 8.3 Datenlage (IVI, thinkstep, TÜV, ika)

Die folgende Darstellung gibt eine Übersicht über die zum Projektende im Tool hinterlegten Daten (grün gefülltes Feld) bzw. zeigt auf, für welche Einsatzcharakteristika noch keine Daten (rot gefülltes Feld) zur Verfügung stehen.

#### 8.3.1 Referenzbusse mit Heizediesel

##### Referenz 12m

Topographie-Klasse  
km/h 1 2 3 4 5

>10≤15	■	■	■	■	■
>15≤20	■	■	■	■	■
>20≤25	■	■	■	■	■
>25≤30	■	■	■	■	■
>30	■	■	■	■	■

##### Referenz 18m

Topographie-Klasse  
km/h 1 2 3 4 5

>10≤15	■	■	■	■	■
>15≤20	■	■	■	■	■
>20≤25	■	■	■	■	■
>25≤30	■	■	■	■	■
>30	■	■	■	■	■

#### 8.3.2 Referenzbusse ohne Heizediesel

##### Referenz 12m

Topographie-Klasse  
km/h 1 2 3 4 5

>10≤15	■	■	■	■	■
>15≤20	■	■	■	■	■
>20≤25	■	■	■	■	■
>25≤30	■	■	■	■	■
>30	■	■	■	■	■

##### Referenz 18m

Topographie-Klasse  
km/h 1 2 3 4 5

>10≤15	■	■	■	■	■
>15≤20	■	■	■	■	■
>20≤25	■	■	■	■	■
>25≤30	■	■	■	■	■
>30	■	■	■	■	■

### 8.3.3 Hybridbusse mit Heizediesel

#### Seriell Supercap 12m

Topographie-Klasse  
km/h    1   2   3   4   5

>10≤15	■	■	■	■	■	■
>15≤20	■	■	■	■	■	■
>20≤25	■	■	■	■	■	■
>25≤30	■	■	■	■	■	■
>30	■	■	■	■	■	■

#### Seriell Supercap 18m

Topographie-Klasse  
km/h    1   2   3   4   5

>10≤15	■	■	■	■	■	■
>15≤20	■	■	■	■	■	■
>20≤25	■	■	■	■	■	■
>25≤30	■	■	■	■	■	■
>30	■	■	■	■	■	■

#### Parallel Batterie 12m

>10≤15	■	■	■	■	■	■
>15≤20	■	■	■	■	■	■
>20≤25	■	■	■	■	■	■
>25≤30	■	■	■	■	■	■
>30	■	■	■	■	■	■

#### Seriell Batterie 18m

>10≤15	■	■	■	■	■	■
>15≤20	■	■	■	■	■	■
>20≤25	■	■	■	■	■	■
>25≤30	■	■	■	■	■	■
>30	■	■	■	■	■	■

#### Parallel Batterie 18m

>10≤15	■	■	■	■	■	■
>15≤20	■	■	■	■	■	■
>20≤25	■	■	■	■	■	■
>25≤30	■	■	■	■	■	■
>30	■	■	■	■	■	■

#### Leistungsverzweigt Batterie 18

>10≤15	■	■	■	■	■	■
>15≤20	■	■	■	■	■	■
>20≤25	■	■	■	■	■	■
>25≤30	■	■	■	■	■	■
>30	■	■	■	■	■	■

### 8.3.4 Hybridbusse ohne Heizdiesel

#### Seriell Supercap 12m

Topographie-Klasse  
km/h 1 2 3 4 5

>10≤15	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
>15≤20	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
>20≤25	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
>25≤30	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
>30	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■

#### Seriell Supercap 18m

Topographie-Klasse  
km/h 1 2 3 4 5

>10≤15	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
>15≤20	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
>20≤25	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
>25≤30	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
>30	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■

#### Parallel Batterie 12m

>10≤15	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
>15≤20	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
>20≤25	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
>25≤30	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
>30	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■

#### Seriell Batterie 18m

>10≤15	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
>15≤20	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
>20≤25	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
>25≤30	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
>30	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■

#### Parallel Batterie 18m

>10≤15	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
>15≤20	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
>20≤25	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
>25≤30	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
>30	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■

#### Leistungsverzweigt Batterie 18

>10≤15	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
>15≤20	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
>20≤25	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
>25≤30	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
>30	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■

## 8.4 Softwareumgebung & Datenschutz (TÜV)

Die Realisierung des Softwaretools findet auf Basis von MS Excel statt. Zum Erhalt des Datenschutzes werden alle Datensätze in Excel anonymisiert hinterlegt, so dass kein Rückschluss auf einen einzelnen Fahrzeughersteller oder ein Verkehrsunternehmen möglich ist.

Zusätzlich werden die Arbeitsblätter, welche nicht zur Interaktion mit dem Anwender benötigt werden, versteckt und sowohl die einzelnen Tabellenblätter, als auch das gesamte Dokument mit Passwörtern geschützt. Hierdurch wird der Zugriff des Anwenders auf die Eingabe- und Ausgabemaske und dort auf die farblich markierten Bereiche limitiert.

Als weitere Sicherheitsstufe wird das Speichern des Dokuments verhindert und eine separate Export-Funktion implementiert. Hierdurch erhält der Anwender die Möglichkeit, das Ergebnis der Analyse zu speichern oder weiterzuverwenden, ohne dass die im Tool hinterlegten Formeln, Makros und Datensätze weitergereicht werden.

## **8.5 Toolimplementierung (TÜV)**

Da die Zielgruppe für die Nutzung des Tools im Wesentlichen aus Verkehrsunternehmen oder verkehrsunternehmennahen Dienstleistern besteht, sind eine probeweise Nutzung des Tools durch diese und die Verwertung entsprechender Rückmeldung wichtige Bausteine bei der Finalisierung des Tools. Um Rückmeldungen strukturiert sammeln zu können wurde ein entsprechender Fragebogen entwickelt und zusammen mit dem Tool an ausgewählte Verkehrsunternehmen geschickt. Die entsprechenden Rückmeldungen und Optimierungsvorschläge wurden dann in der finalen Version berücksichtigt.

## **8.6 Haftungsausschluss (TÜV)**

Eine Haftung der Auftragnehmer für die Ergebnisse des Softwaretools, im speziellen hinsichtlich möglicher Ansprüche durch Verkehrsunternehmen für Fehlentscheidungen bei der Fahrzeugbeschaffung, ist prinzipiell auszuschließen. Hierzu ist eine entsprechende Klausel im Software-Tool hinterlegt (siehe Abbildung 67).

## 9 Laufende Erfolgskontrolle / Monitoring (AP5)

### 9.1 Zielsetzung und Vorgehensweise

Die laufende Erfolgskontrolle erfolgt für die Teilbereiche Kostenentwicklung, Primärenergieeinsparung und Fördereffizienz.

Das Kostenmonitoring umfasst die Erfassung, Beobachtung und kostenmäßige Bewertung

- der Verfügbarkeit der Hybridbusse im Vergleich zu Referenzfahrzeugen,
- der Entwicklung der Instandhaltungskosten, v.a. im Hinblick auf ungeplante Reparaturen etc. sowie
- der tatsächlich erzielten Verbrauchseinsparungen.

Die laufende Erfolgskontrolle in Bezug auf die Primärenergieeinsparung und damit auf die Ressourcenschonung basiert auf den erhobenen Daten zum Kraftstoffverbrauch. Die Visualisierung erfolgt dabei mit Hilfe der webbasierten Software SoFi, so dass der Auftraggeber mittels eines personalisierten Zugangs bei Bedarf jederzeit Auswertungen zum Status des Projektes auf Basis vordefinierter Berichte zu Klimaschutz und Einsparung von Treibhausgasen abrufen kann.

Die in der verfügbaren Datenbasis des vom BMVI geförderten Projektes EFBEL vorhandenen Emissionsdaten sowie die Ergebnisse des vorliegenden Projekts werden genutzt, um das Emissionsverhalten der Hybridbusse gegenüber konventionellen Dieselnissen hinsichtlich Luftschadstoffe zu bewerten. Weiterhin ist geplant die Fördereffizienz hinsichtlich der Luftschadstoffemissionen zu bestimmen. Ausgehend von den Emissionsdifferenzen zwischen konventionellen Fahrzeugen und Hybridkonzepten werden insbesondere für CO<sub>2</sub>, PM und NO<sub>2</sub> Kennwerte in kg bzw. t Emissionsminderung je eingesetztem Euro Fördermittel ermittelt.

### 9.2 Ergebnisse

#### 9.2.1 Kostenentwicklung (BbA)

Für die laufende Erfolgskontrolle im Hinblick auf die Kostenentwicklung wurde bereits im Rahmen des Förderprogramms "Hybridbusse für einen umweltfreundlichen ÖPNV" des damaligen Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) von uns im Jahr 2012 ein Kalkulationsmodell erarbeitet, mit welchem die fahrzeugbezogenen und systembedingten Kosten zu einer typisierenden Gesamtdarstellung zusammengeführt werden.

Das vorhandene Kalkulationsmodell wurde an die Erfordernisse des aktuellen Vorhabens angepasst, die wesentlichen Parameter mit den Betreibern abgestimmt und in allen Teilbereichen auf das für die Projektlaufzeit relevante Preisniveau (2014) fortgeschrieben.

Auf Basis der zentralen Parameter dieses Kalkulationsmodells wurde darüber hinaus im Frühjahr 2014 ein Tool entwickelt, welches den Auftraggeber in die Lage versetzen soll, die Auswirkungen verschiedener Förderszenarien auf die Wirtschaftlichkeit von Hybridbussen im Zeitablauf zu simulieren.

#### 9.2.2 Primärenergieeinsparung und Klimaschutz (THG) (thinkstep)

Die tägliche Datenerfassung der Betriebsdaten wird durch die Nutzung der Software SoFi als zentrales Datenerfassungstool unterstützt. Über SoFi erhalten die beteiligten Verkehrsbetriebe

die ständige Möglichkeit, ihre erfassten Betriebsdaten einzusehen, auszuwerten und für ihre eigenen Analysen zu nutzen. Dies ermöglicht den Betrieben eine kontinuierliche Kontrolle der Leistungsfähigkeit der eingesetzten Hybridbusse.

Im Rahmen der Begleitforschung konnten Daten für den neun- bis fünfundzwanzigmonatigen Betrieb der Hybridbusse gesammelt werden.

Die bisher erzielten Einsparungen an vorwiegend fossilem Dieselmotorkraftstoff und Treibhausgasen betragen entsprechend Tabelle 14 in Kapitel 6.1 knapp 430.000 l Diesel bzw. ca. 1.245 t vermiedene Treibhausgasen (in CO<sub>2</sub> Äquivalenten).

### **9.2.3 Emissionsminderung und Fördereffizienz (TÜV NORD, thinkstep, VCDB)**

#### *Emissionsminderung*

Im Rahmen des BMUB Begleitforschungsprogramms sind keine konkreten Messuntersuchungen zu Schadstoffemissionen vorgesehen. Diese sind im Vorgängerprojekt vom TÜV NORD detailliert im Rahmen von umfangreichen Rollenprüfstandsversuchen ermittelt worden.

An dieser Stelle kann außerdem auf Ergebnisse des aktuell vom BMVI geförderten EFBEL Projektes zurückgegriffen werden. Im Rahmen dieses Projektes zur Begleitforschung sind Abgasemissionen unterschiedlicher Solo- und Gelenkbusse (mit und ohne Hybridantrieb) in einem standardisierten Verfahren vom TÜV NORD und dem ika der RWTH Aachen auf acht als für den Verkehrsverbund Rhein-Ruhr repräsentativ ausgewählten Strecken gemessen worden. Dazu sind die verschiedenen Fahrzeuge mit portabler Emissionsmesstechnik zur Bestimmung der Bestandteile der Schadstoffemissionen ausgerüstet worden. Flankierend dazu sind die fahrzeugspezifischen Betriebsdaten mit Hilfe von elektrischen Leistungsmessgeräten sowie mit Abgriffen der Onboard-Diagnostik aufgezeichnet worden. Die umfassende Datenerfassung ermöglicht eine detaillierte Auswertung der Betriebsweise der jeweiligen Hybridkonzepte. Neben den aggregierten Kerndaten lassen sich so Haltestellenan- und -abfahrten und andere Einzelereignisse analysieren. Zusammenfassend lassen sich die bisher gewonnenen Messergebnisse in gemittelter Form wie folgt darstellen (siehe Abbildung 69). Die Fehlerindikatoren zeigen dabei die Extrema der Messfahrten auf, d.h. die Fahrten mit den höchsten bzw. niedrigsten Emissionswerten um die Bandbreite des Emissionsverhaltens der einzelnen Fahrzeugtypen aufzuzeigen.

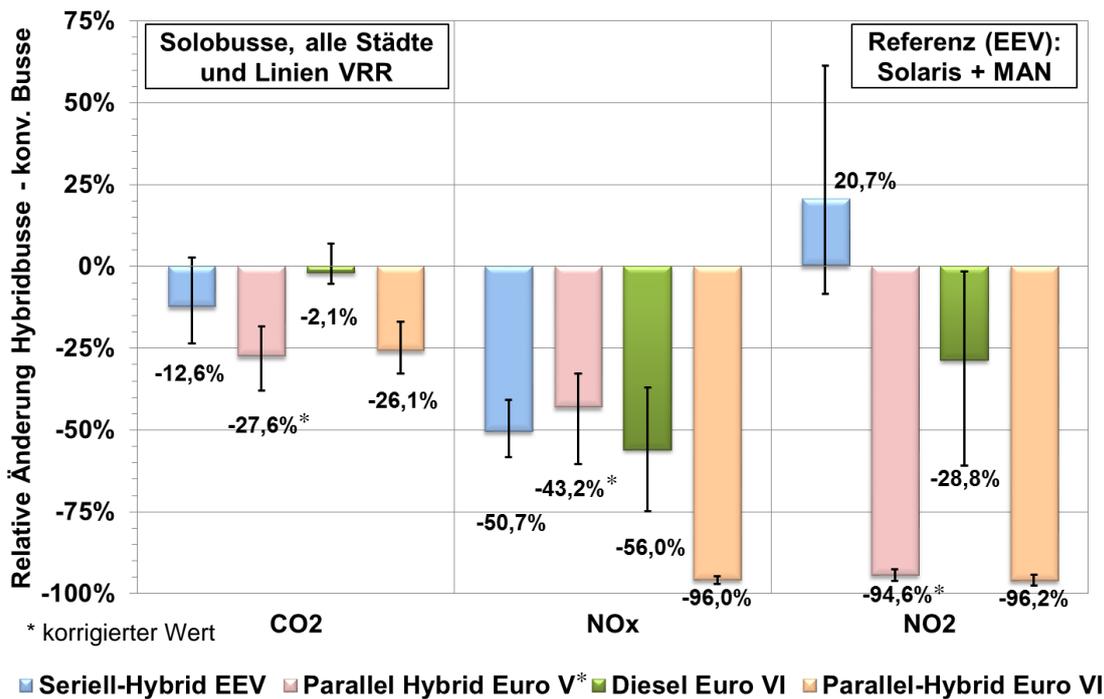


Abbildung 69: Solobusse - Abgasemissionen EFBEL Messuntersuchungen

Im Rahmen der Untersuchung der Solobusse sind zwei Dieselhybridbusse mit Euro V/EEV<sup>6</sup>, ein konventioneller Dieseldieselbus, der die neue Euro VI – Abgasnorm erfüllt, sowie ein Dieselhybridbus der ebenfalls die Euro VI Norm erfüllt vermessen worden. Als Referenz ist der Mittelwert der Messungen zweier Dieseldieselbusse angenommen worden, die zusammen einen Großteil der Flotte in Deutschland bilden.

Allen Fahrzeugen ist gemein, dass sie im Mittel einen geringeren Ausstoß an Kohlendioxid im Vergleich zu konventionellen Dieseldieselfahrzeugen nach Euro V – EEV Abgasnorm aufweisen. Einzelne Fahrten zeigen jedoch auch, dass sich – je nach Verkehrssituation und Streckenprofil – auch erhöhte Emissionswerte ergeben können. Für die drei Hybridfahrzeuge ergeben sich Reduktionen bei den Kohlendioxidemissionen (CO<sub>2</sub>) im Mittel von 13-28%, wobei das Parallelkonzept Vorteile gegenüber dem seriellen Hybrid zeigt. Da die Emissionen von Kohlendioxid – unter Vernachlässigung des verschwindend geringen Kohlenmonoxid-ausstoßes – proportional zum Kraftstoffverbrauch sind, lassen sich so auch analoge Aussagen über die mögliche Kraftstoffeinsparung treffen.

Bei den NO<sub>x</sub>-Schadstoffemissionen zeigt sich, dass sowohl die beiden Hybridfahrzeuge, die die Abgasnorm Euro V/EEV erfüllen, als auch das Dieseldieselfahrzeug nach Euro VI – Norm signifikante Reduktionen in einer Größenordnung von 50- 60% aufweisen. Hervorzuheben ist jedoch hier, dass die Hybridfahrzeuge, die nach Euro V - EEV zertifiziert sind, bereits Werte erreichen, die mit konventionell angetriebenen Fahrzeugen erst unter Einsatz deutlich aufwändigerer Abgasnachbehandlungstechnik zur Erfüllung der Euro VI - Norm realisierbar sind. Die größte Reduktion hinsichtlich NO<sub>x</sub> weist der Euro VI Hybridbus auf. Hier ergibt sich im Mittel eine Reduktion von 96%, das heißt die NO<sub>x</sub> Emissionen werden fast vollständig eliminiert. Dies zeigt das signifikante Potenzial auf, das Hybridbusse zur Reduktion der Stickoxidemissionen

<sup>6</sup> Enhanced Environmental-friendly Vehicle

des busbasierten ÖPNV leisten können, vor allem natürlich Fahrzeuge, die der aktuelle Euro VI Abgasnorm entsprechen. Allerdings soll hier nicht unerwähnt bleiben, dass weitere Messungen an dem in Abbildung 69 dargestellten konventionell betriebenen Euro VI Fahrzeug auch deutlich höhere NO<sub>x</sub>-Konvertierungsraten, d.h. niedrigere NO<sub>x</sub> Emissionen, ergeben haben als in der Grafik gezeigt. Aufgrund fehlender Vergleichbarkeit sind diese Ergebnisse hier allerdings nicht dargestellt.

Für die Stickstoffdioxid-Emissionen ergibt sich ein uneinheitliches Bild bei den relativen Vergleichswerten. Hier spielt die verwendete NO<sub>x</sub>-Reduktionstechnologie eine Rolle. Der serielle Hybrid verwendet eine Abgasrückführung (AGR), während der Parallel-Hybrid die SCR<sup>7</sup> Technologie nutzt. Alle Fahrzeuge unterschreiten die jeweils geltenden Grenzwerte jedoch erheblich.

### *Fördereffizienz*

Eine Bestimmung der Fördereffizienz im Sinne von kg/ Tonne eingesparte Schadstoffe je eingesetzte € Fördermittel liefert einen Wert von 6,3 kg CO<sub>2</sub>e vermieden/ € Fördermittel bzw. Minderungskosten von 158 €/ t CO<sub>2</sub>e. Hierzu wurde das entsprechend Tabelle 14 bestimmte Reduktionspotenzial für Treibhausgase auf die für die Beschaffung der Hybridbusse bewilligten Fördermittel bezogen. Während dieser Wert im Vergleich zu Maßnahmen beispielsweise im Gebäudebereich bzw. stationären Energiebereich, die häufig negative Minderungskosten im niedrigen zweistelligen Bereich aufweisen<sup>8</sup>, höher ausfällt, ist zu berücksichtigen, dass CO<sub>2</sub> Minderungsmaßnahmen im Verkehrssektor auf Basis der Hybridisierung des Antriebsstranges in der Regel deutlich höhere Kosten aufweisen. So liegt der hier erzielte Wert deutlich unter dem für das Jahr 2020 skizzierten Wert von über 500 €/ t CO<sub>2</sub> und liegt im Bereich des für das Jahr 2030 prognostizierten Wertes von 100 – 200 €/ t CO<sub>2</sub> [BDI, 2007]. Dies deckt sich auch mit aktuellen Untersuchungen zu spezifischen CO<sub>2</sub> Vermeidungskosten bei Bussen, die im Bereich 86 - 308 €/t CO<sub>2</sub> liegen [UBA, 2015]. Eine Berücksichtigung des durch verschiedene Umfragen belegten Effektes der Attraktivitätssteigerung des ÖPNV (z.B. [Faltenbacher et al., 2011] durch den Einsatz energieeffizienter und umweltfreundlicher Hybridbusse ist dabei noch nicht berücksichtigt. Die durch den Einsatz von Hybridbussen gegenüber konventionellen Dieselnissen gesenkten externen Kosten<sup>9</sup> wurden in Kapitel 6.2.6 eingehend betrachtet. Die Einsparung an Umweltkosten liegt für Euro V bzw. Euro VI Solo-Hybridbusse bei ca. 10-11 bzw. 6 ct/ km.

---

<sup>7</sup> Selective Catalytic Reduction (Selektive katalytische Reduktion)

<sup>8</sup> Z.B. liegen die CO<sub>2</sub> Minderungskosten im Impulsprogramm für Mini-KWK-Anlagen (IPMK) des BMUB bei ca. -20 €/ t CO<sub>2</sub> [Öko-Institut et al, 2012]

<sup>9</sup> Laut Empfehlung des UBA liegen für das Bezugsjahr 2010 die geschätzten Umweltkosten eines konventionellen Dieselnisses im Innerorts-Bereich bei 54,4 ct/km [UBA, 2014].

## 10 Lösungsvorschläge und Optimierung (AP6)

### 10.1 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.

### 10.2 Ergebnisse

Während der laufenden Untersuchung wurden die (Zwischen-) Ergebnisse stets auch vor dem Hintergrund möglicher Verbesserungspotenziale und Problemlösungen bewertet. Hier ist zunächst festzuhalten, dass in den ersten Betriebsmonaten der Hybridbusse keine offensichtlichen Systemfehler aufgetreten sind, die eine sofortige Intervention oder Nachbesserung seitens der Hersteller erforderlich gemacht hätten. Dies gilt insbesondere für die Komponenten der Elektrotraktion im engeren Sinne. Aufgetretene Fehler, die als hybridspezifisch eingestuft wurden, waren eher beim Zusammenspiel von Diesel- und Elektroantrieb angesiedelt. Ausfälle, die durch Defekte im Traktionsenergiespeicher oder den Elektromotoren hervorgerufen wurden, waren äußerst selten bzw. fehlten ganz.

Gleichwohl wurden Defekthäufungen beobachtet, bei denen die Behebung zu mitunter längeren Standzeiten führte. So ärgerlich diese Ausfälle für den Betreiber im Einzelfall sind, so müssen sie doch vor dem Hintergrund der in Summe sehr erfreulichen Verfügbarkeitsrate der Hybridbusse sowohl hersteller-/typenbezogen als auch auf Betreiberebene gesehen und relativiert werden.

Interessant wäre eine Verfolgung über einen längeren Betriebszeitraum, um zu beurteilen, ob die Probleme nachhaltig gelöst werden konnten oder nach einem gewissen Intervall wieder auftraten.

#### 10.2.1 Ergebnisse Linienbetrieb und Vorschläge zur Unterstützung bei der Behebung technischer Probleme (VCDB)

Eine zentrale und positive Erkenntnis aus der Betrachtung des Einsatzes von Diesel-Hybridbussen im Linienbetrieb durch das ausführende Konsortium über nunmehr vier Jahre ist die Entwicklung im Bereich der technischen Verfügbarkeit. Die Einsatzreife der Fahrzeuge ist um durchschnittlich zehn Prozentpunkte gegenüber der Begleitforschung zur ersten Hybridbus-Förderrichtlinie gestiegen. Grundsätzlich funktionieren die Hybridbusse im täglichen Linieneinsatz und die hohe Einsatztauglichkeit schlägt sich auch in der Zufriedenheit bei den meisten Verkehrsunternehmen nieder. Dort ist derjenige Bus der beste, der ohne Spezialbehandlung und ohne aufzufallen im regulären Linienbetrieb „mitschwimmt“. Dies wurde den eingesetzten Fahrzeugen von mehreren Betreibern so attestiert.

Die hohe technische Qualität der Fahrzeuge äußert sich auch darin, dass sich bereits drei der sieben beteiligten Verkehrsunternehmen sehr konkret mit Folgebeschaffungen von Hybridbussen befassen, teilweise unter Inanspruchnahme der zwischenzeitlich veröffentlichten neuen Förderrichtlinie des BMUB.

Erfreulich ist die Erkenntnis, dass die innovativen Baugruppen auf den Hybridbussen, etwa die Elektrotraktion und die Traktionsenergiespeicher, vergleichsweise selten die Ursache für Fahrzeugausfälle waren. Dies spricht für einen recht hohen technischen Reifegrad dieser Komponenten.

Probleme, die als hybridbus-spezifisch zu bewerten sind, traten vor allem an den Schnittstellen auf, wo Diesel- und Elektrotraktion aufeinandertreffen, nämlich mechanisch im Bereich der Getriebe oder im Bereich der Antriebssteuerung. Demnach führt eher die systemimmanente Komplexität eines Hybridbusses zu Problemen als die „elektromobilen“ Komponenten.

Häufige Fehlerursachen sind jedoch völlig unabhängig vom Hybridsystem und könnten bei konventionellen Bussen gleichsam auftreten. Die befragten Werkstattleiter qualifizierten solche Defekte und Störungen nicht als ausschließliches Problem der Hybridbusse. Jedoch führen auch diese Defekte zu Unzufriedenheit mit dem Fahrzeug und können der Wahrnehmung der Hybridbusse als Innovationsträger innerhalb der Verkehrsunternehmen abträglich sein.

So lassen sich die in Kapitel 5.2.1 und den zugehörigen Anlagen dargestellten Fehlerquellen teilweise als Produktmängel interpretieren, da sie bei mehreren Fahrzeugen (bzw. zum Teil annähernd flottenweit) auftraten und/oder zu längeren Standzeiten bis hin zu Werksrückführungen zum Hersteller geführt haben. Hier empfiehlt es sich für die Hersteller, die aufgetretenen Probleme genauer zu analysieren und entsprechende Gegenmaßnahmen in der Produktion nachfolgender Fahrzeuge zu veranlassen. Dies gilt insbesondere für solche Fehlerquellen, die man eher dem Low-Tech-Bereich zuordnen würde, wie etwa ein Blinkerhebel (38 Ausfalltage bei einem Betreiber innerhalb von drei Monaten).

Allerdings muss in Einzelfällen auch hinterfragt werden, inwieweit organisatorische Defizite beim Betreiber zu Stillstandszeiten führen. So wurde in einem konkreten Fall ein Fahrzeug für etwa zwei Wochen stillgelegt mit der Begründung, dass die Frist der Hauptuntersuchung abgelaufen sei. Ein sicher vermeidbarer Ausfall. In einem weiteren Fall wurde ein dreitägiger Werkstattaufenthalt mit einem Ölwechsel begründet, was vermutlich schneller durchzuführen geht.

Für die stellenweise auftretenden Probleme im Bereich des technischen Supports ist es schwierig, in die Zukunft gerichtete Empfehlungen auszusprechen. Die geschilderten Service-defizite bei Hersteller 3 sind unter dem Aspekt zu sehen, dass hier nur die Meinung eines Betreibers erfasst wurde. Da es sich beim Betreiber jedoch um einen bedeutenden Kunden mit einer (auch über die erfassten Fahrzeuge hinaus) großen Flotte handelt, sollten die genannten Defizite Anlass geben, Prozesse zu überprüfen und zu optimieren. Auch bei Hersteller 2 wurden wiederholt Defizite beim Support bemängelt. Diese betrafen wiederholt die fehlende Verfügbarkeit von Ersatzteilen, zudem führten teils langwierige Abstimmungen mit der Konzernzentrale vor der Bearbeitung von Gewährleistungsschäden zu Unzufriedenheit.

Hier sind entsprechend vor allem die Fahrzeughersteller gefordert, bestehende Defizite in den Prozessen zu beseitigen. Im Rahmen künftiger Förderinstrumente wird es schwerlich möglich sein, hier eine Verbesserung zu bewirken. Denn anders als mit der Vorgabe bestimmter technischer Parameter (z. B. Verbrauchswerte), die das durch ein Verkehrsunternehmen ausgewählte Fahrzeug erfüllen muss, lassen sich Kriterien im After-Sales kaum förderrechtlich erfassen.

### 10.2.2 Empfehlungen zum optimalen Linieneinsatz (IVI)

Die Hybridbuskonzepte weisen unterschiedliche Ergebnisse bzgl. der Kraftstoffeinsparung gegenüber konventionellen Dieselnissen in Abhängigkeit von den Eigenschaften der bedienten Linien aus. Als Eignungskriterien lassen sich basierend auf den vorhandenen Daten die Topographie einer Linie sowie die auf ihr gefahrenen mittleren Reisegeschwindigkeiten benennen. Dabei überwiegt der Einfluss der Topographie, speziell der zu überwindenden Höhenmeter pro Kilometer und der Anteil sog. kritischer Steigungen.

Das Einsparpotential der Hybridbusse zeigt sich insbesondere auf Linien mit einem geringen Anteil lang anhaltender Steigungsstrecken (Topographieklassen 1 und 2). Sowohl die Solohybridbusse (unabhängig vom Hybridkonzept) als auch die leistungsverzweigten Gelenkhybridbusse weisen dort einen merklich reduzierten Kraftstoffbedarf auf.

Die nun vorliegenden Daten für Busse mit parallelem Hybridantrieb und Batteriespeicher zeigen auch bei anspruchsvollen Höhenprofilen sowohl bei Solo- als auch bei Gelenkbussen gute Einsparungen.

Der Einsatz von Gelenkbussen mit seriellem Hybridantrieb führte bisher nur zu geringen Verbrauchsminderungen. Solche mit Batteriespeicher erzielten dabei die besseren Resultate. Um diese Fahrzeuge für die Verkehrsunternehmen betriebswirtschaftlich interessanter zu machen, müssen weitere Optimierungen zur Kraftstoffeffizienz, nicht zuletzt im Bereich der Beheizung des Fahrgastraums erfolgen.

Da die klimatischen Unterschiede innerhalb Deutschlands gering sind, ist zu erwarten, dass diese im Vergleich zur Streckencharakteristik auf die Kraftstoffeinsparungen nur äußerst geringe Auswirkungen zeitigen. Lediglich für höher gelegene Städte, in denen noch dazu eine anspruchsvollere Topographie zu erwarten ist, können sich die Effekte aus höherem Heizbedarf und Topografie überlagern.

In jedem Fall sollte vor dem Einsatz von Hybridbussen untersucht werden, in welchem Maße Einsparungen auf den ausgewählten Linien, Fahrzeugumläufen oder im netzweiten Einsatz mit den aktuell verfügbaren Fahrzeugen zu erwarten sind. Das sollte insbesondere auch mit Blick auf die ständige technische Weiterentwicklung sowohl der konventionellen Dieselnisse als auch der Hybridbusse geschehen, welche Veränderungen der Verbrauchsdifferenzen bewirken können.

Hinsichtlich der vom Fahrpersonal angegebenen Einschränkungen im Anfahr- und Beschleunigungsverhalten bei parallelen und seriellen Solobussen bieten die Fahrzeuge weiteres Verbesserungspotential.

Als weitere zukünftige Aufgabe steht eine vereinheitlichte Signalisierung hybridspezifischer Eigenschaften (Speicherinhalt, effizientes Fahren) in das Anzeigekonzept des Fahrer Arbeitsplatzes an. Hier gibt es Beispiele, die vom Fahrpersonal als gut und übersichtlich empfunden werden. Hingegen führen viele Detailangaben, Schaubilder und Auswahlmenüs dazu, dass diese entweder nicht genügend wahrgenommen werden oder als ablenkend von den eigentlichen Fahraufgaben empfunden werden. Eine Einschränkung auf notwendige Signale und deren übersichtliche Darstellung ist erforderlich.

### 10.2.3 Kosten des Linienbetriebs pro Kilometer (BbA)

#### 10.2.3.1 Abschätzung Entwicklung der Rahmenbedingungen

Die folgende Betrachtung basiert auf den Solobussen von Hybrid Solo 4, da diese aktuell die geringsten Mehrkosten gegenüber den Dieselreferenzfahrzeugen aufweisen (vgl. Abbildung 39).

Bezüglich der Kostensituation für Hybridfahrzeuge sind insbesondere folgende Punkte relevant, deren Entwicklung wie folgt eingeschätzt werden kann:

#### *Anschaffungsmehrkosten*

Die Anschaffungsmehrkosten (ohne Miete für den Energiespeicher) betragen aktuell bei den hier betrachteten Hybrid Solo 4 ca. 85 T€.

Es ist davon auszugehen, dass in diesen Kosten in erheblichem Umfang Entwicklungskosten für die noch immer in der Einführungsphase befindliche Hybridtechnologie enthalten sind. Eine schrittweise Reduzierung des Anschaffungsmehrpreises auf einen Zielwert von ca. 40 T€ ( $\cong$  ca. -10% p.a.) sollte im Hinblick auf die Wettbewerbsfähigkeit dieser Technologie von den Herstellern bis 2020 erreicht werden können.

#### *Kraftstoffeinsparung*

Eine Kraftstoffeinsparung von 20% oder auch darüber wird in der Praxis zwischenzeitlich nach den vorliegenden Daten vielfach realisiert; eine Steigerung auf mindestens 25% für gängige Einsatzszenarien erscheint bis 2020 erreichbar.

#### *Dieselpreis*

Die Dieselpreisentwicklung der letzten Jahre war sehr uneinheitlich; eine tragfähige Prognose ist hier ohnehin kaum möglich.

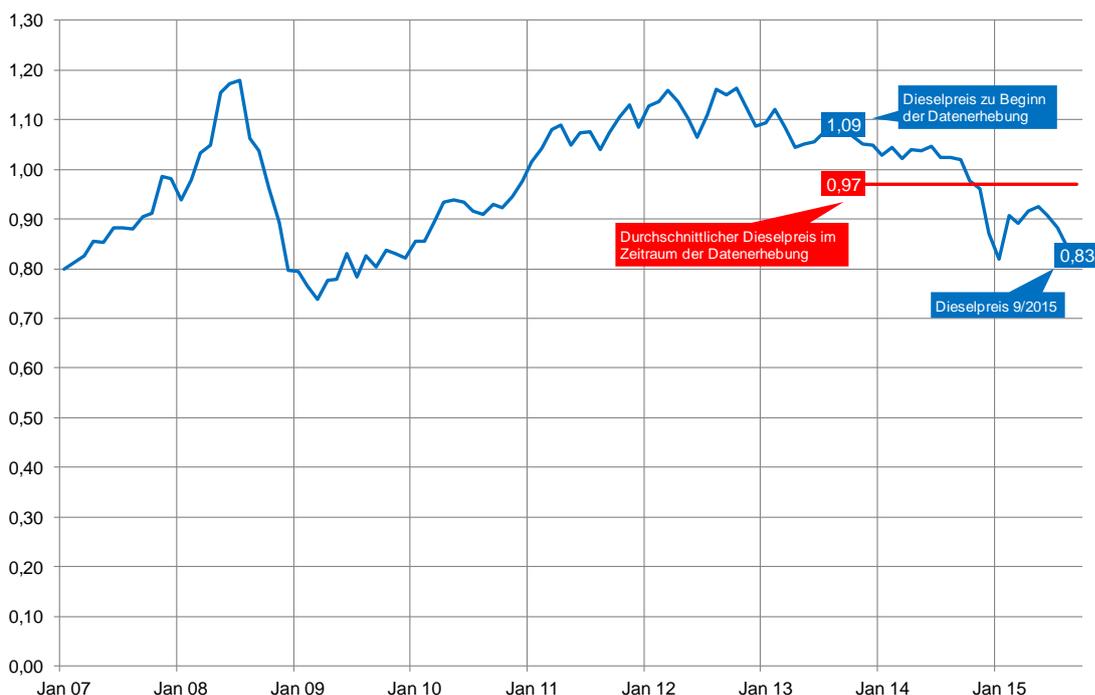


Abbildung 70: Entwicklung Dieselpreis Januar 2007 bis September 2015

Gemäß Statistischem Bundesamt betrug die Preissteigerung zwischen 1995 und 2013 durchschnittlich 5% p.a. (inkl. Mineralölsteuer nach Ökosteuererstattung und Erdölbevorratungsbeitrag, exkl. Umsatzsteuer); im Zeitraum der Datenerhebung ist dagegen ein erheblicher Preisverfall zu verzeichnen [Statistisches Bundesamt, 2015].

In der folgenden Prognose wird zunächst exemplarisch eine konstante Preissteigerung von 2% p.a. zugrunde gelegt. Der jährlich steigende Dieselpreis während der Nutzungsdauer wird dabei in Jahresscheiben berücksichtigt, d.h. es fließen hier die jeweiligen unterstellten Durchschnittspreise der einzelnen Nutzungsjahre ein (ohne Abzinsung).

#### *Kosten für Energiespeicher (Batteriemiete)*

Aktuell betragen die Kosten für den Energiespeicher der Hybrid Solo 4 (inkl. Ersatzakku innerhalb der ersten 10 Nutzungsjahre und der Übernahme sämtlicher Ausfallrisiken) ca. 4.800 € p.a. für einen Solobus.

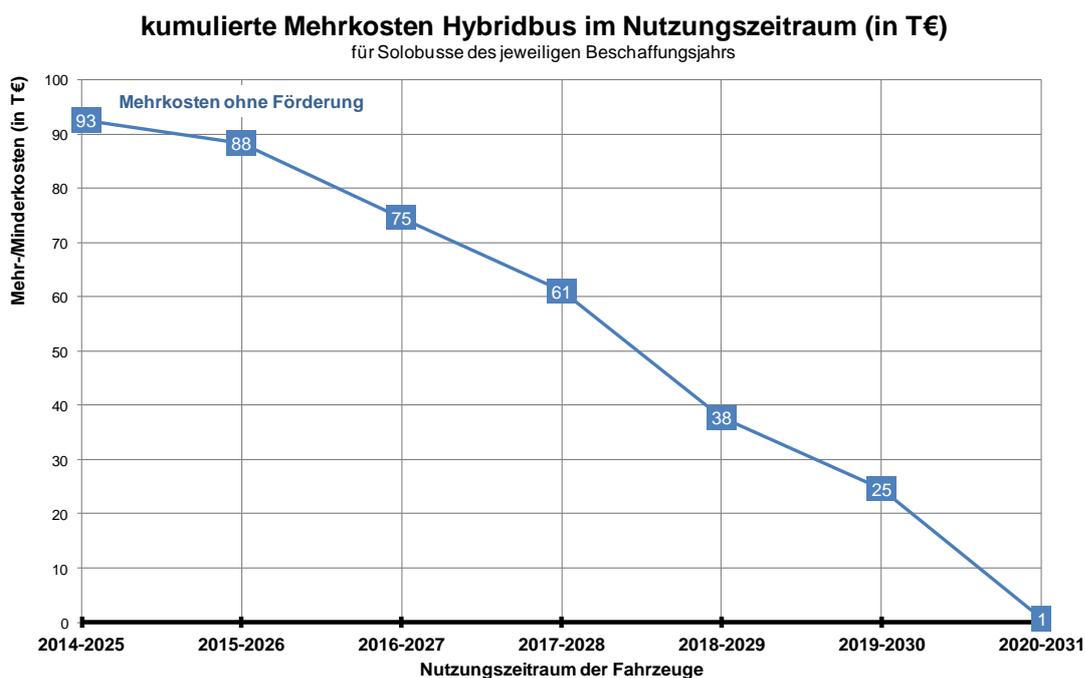
Die Preise für leistungsfähige Akkumulatoren waren in den letzten Jahren stark rückläufig (ca. -66% seit 2010). Dies ist jedoch differenziert zu betrachten, da es sich beim Busbereich um einen relativ kleinen Markt handelt, der aus Sicht der Batteriehersteller von untergeordneter Bedeutung ist; hier sollte in den nächsten Jahren eher von einer Kostenreduzierung in einer Größenordnung von 5%-7% p.a. ausgegangen werden (für die Prognose werden 5% p.a. angenommen).

#### *Mehraufwand Instandhaltung Hybridbus*

Für die Instandhaltung der hybridspezifischen Komponenten im Lebenszyklus (ohne etwaigen Tausch der Energiespeicher) wird insgesamt von 10% der hybridspezifischen Mehrkosten ausgegangen (vgl. Ausführungen zum AP 1, Kapitel 6.2.1.1 A).

#### 10.2.3.2 Prognose der Kostensituation

Die zu erwartenden Kosten für Hybridbusse ohne Förderung (exemplarisch für ein Solofahrzeug mit 12 Jahren Nutzungsdauer und einer Laufleistung von 60.000 km p.a.) mit den dargestellten Entwicklungen betragen entsprechend Abbildung 71 im hier untersuchten Szenario für 2014 beschaffte Busse ca. 93.000 € über die gesamte Nutzungsdauer. Der Break-even-Punkt (ohne Förderung) erscheint für Hybridbusse, die ab etwa 2020 beschafft werden, unter den getroffenen Annahmen (vgl. Kapitel 10.2.3.1) erreichbar.



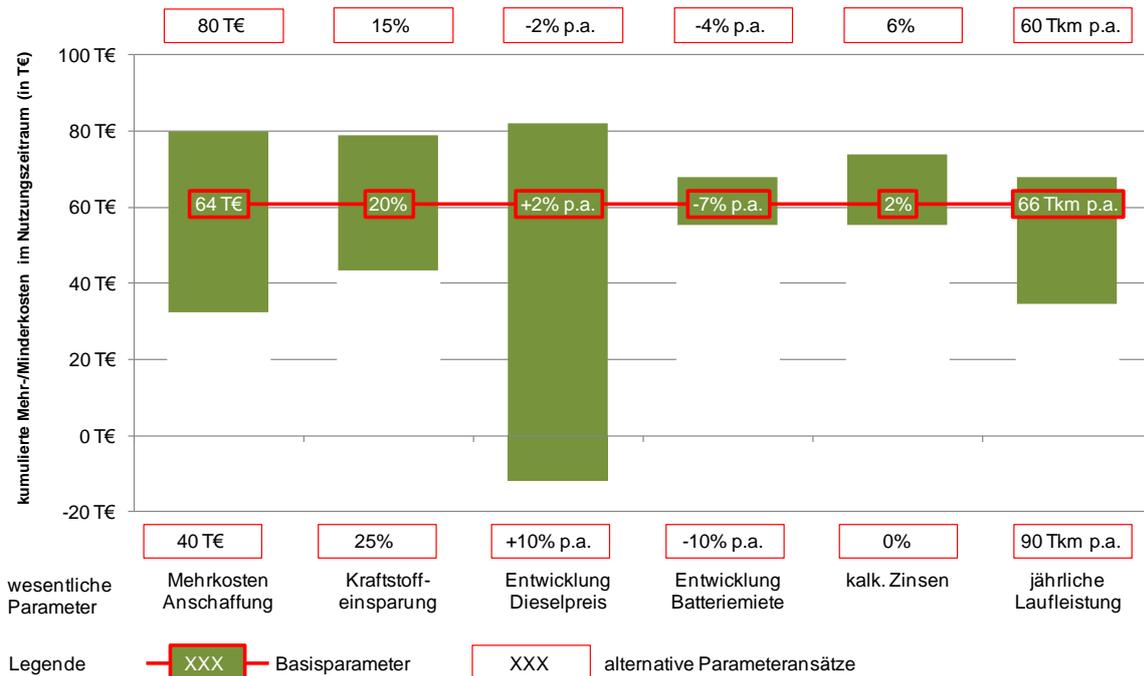
**Abbildung 71: Kumulierte Mehrkosten für Hybridfahrzeug im Nutzungszeitraum - ohne Förderung**  
(Beispiel Hybrid Solo 4)

### 10.2.3.3 Sensitivitätsanalyse

Die konkreten Auswirkungen der prognostizierten Entwicklungen auf die Kostensituation der Betreiber hängen davon ab, wie sich die Rahmenbedingungen (vgl. Kapitel 10.2.3.1) tatsächlich verändern werden. Hier wurden u.E. realistische Annahmen getroffen; die Auswirkungen einer Variation verschiedener Annahmen (Sensitivitätsanalyse) sind aus der folgenden Abbildung ersichtlich.

Es wird deutlich, dass in erster Linie die erzielbare Kraftstoffeinsparung in Verbindung mit der Entwicklung des Dieselpreises den entscheidenden Einfluss auf die Kostensituation von Hybridbussen hat; auch die jährliche Laufleistung ist ein wesentlicher Faktor.

Bei der Dieselpreisentwicklung wurde z.B. eine Preissteigerung von 2% p.a. angenommen (vgl. Kapitel 10.2.3.1); daraus ergeben sich in Verbindung mit den übrigen Annahmen insgesamt 61.000 € Mehrkosten für einen Hybrid-Solobus im Nutzungszeitraum von 12 Jahren. Nimmt man stattdessen eine Preissteigerung für Dieselkraftstoff von +10% p.a. an, so errechnen sich im Laufe des Nutzungszeitraums für 2017 beschaffte Busse Minderkosten von ca. 12.000 €; rechnet man hingegen mit einem konstanten Dieselpreis, so errechnen sich Mehrkosten in Höhe von ca. 70.000 €.



**Abbildung 72: Sensitivitätsanalyse für 2017 beschaffte Busse – ohne Förderung**  
(Beispiel Hybrid Solo 4)

### 10.2.3.4 Empfehlungen

Die obige Darstellung zeigt, dass aus Sicht der Betreiber für die Hybridbustechnologie in den nächsten Jahren aller Voraussicht nach zunächst noch – wenn auch abnehmende – Kostennachteile verbleiben. Dem kann durch eine entsprechende Förderung der Hybridbustechnologie begegnet werden.

Im Folgenden wird der wirtschaftliche Rahmen einer Förderung skizziert, die

- den Herstellern aufzeigt, in welche Richtung die Entwicklung (Fahrzeugpreis und Kraftstoffeinsparung) gehen muss, wenn diese Technologie eine Zukunft haben soll,
- die Betreiber merklich von den noch bestehenden hybridspezifischen Mehrkosten entlastet (d.h. die Lebenszykluskosten für einen Hybridbus nähern sich den Kosten eines aktuellen konventionellen Dieselsebusses an),
- die Nachfrage nach Hybridbussen stimuliert und
- sich ggf. auch auf andere innovative Antriebe übertragen lässt.

Diese Ziele werden erreicht durch

- eine anfängliche Förderung der Anschaffungsmehrkosten mit einem von Anschaffungsjahr zu Anschaffungsjahr abschmelzenden Fixbetrag („Hybridprämie“) zzgl.
- einer temporären Verkürzung der Abschreibungsdauer für Hybridbusse („Sonderabschreibung“).

Die Kalkulation des Fixbetrags kann sich zwar zunächst prozentual an den zu erwartenden Anschaffungsmehrkosten orientieren, jedoch sollte in der Förderrichtlinie selbst jeweils ein anfänglich zu zahlender Fixbetrag ausgewiesen werden. Dies hat folgende Vorteile:

- Mitnahmeeffekte durch eine kreative Preisgestaltung (vermeintlich geringer Grundpreis zzgl. hoher hybridspezifischer Kosten) werden vermieden.
- Den Herstellern wird ein Fahrplan zur Senkung der hybridspezifischen Mehrkosten aufgezeigt.

Eine abschmelzende Förderung belohnt darüber hinaus Verkehrsunternehmen, die sich frühzeitig für die Hybridbustechologie entscheiden, durch eine höhere Fördersumme.

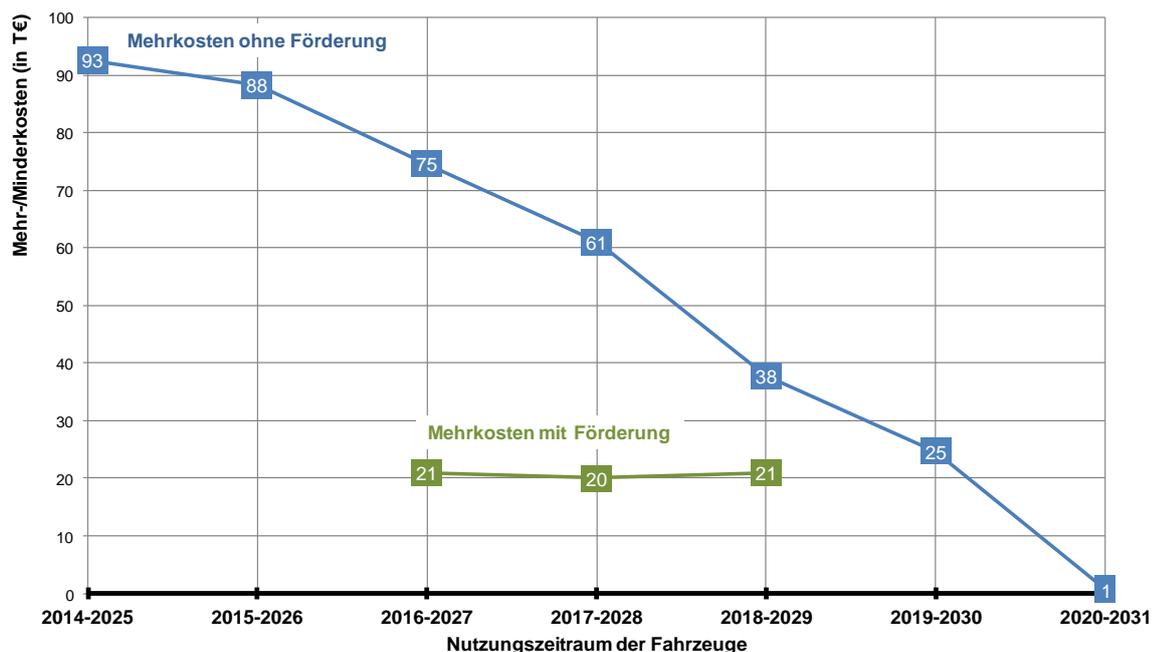
Eine Verkürzung der Abschreibungsdauer bietet neben zinsabhängigen monetären auch weitere Vorteile für die Betreiber; so könnte z.B. ein Unternehmen bei unvorhergesehenen technischen Problemen mit der Hybridantriebstechnik ein solches Fahrzeug wesentlich früher ohne Sondereffekte für das Unternehmensergebnis aussondern.

Für einen Solobus könnte die Hybridprämie unter den in Kapitel 10.2.3.1 aufgeführten Rahmenbedingungen etwa bei 37.500 €/Stk (für 2016 beschaffte Busse) beginnen und bis 2018 auf 15.000 €/Stk abschmelzen. Die Möglichkeit zur verkürzten Abschreibung könnte für im Jahr 2016 beschaffte Busse auf 5 Jahre festgelegt werden.

**Tabelle 24: Vorschlag Förderszenario für Solobus**

	2016	2017	2018	2019	2020
"Hybridprämie" Anteil an den erwarteten Mehrkosten (inkl. Batteriemiete)	37.500 € 33%	25.000 € 24%	15.000 € 16%	entfällt -	entfällt -
Abschreibung über	5 Jahre	5 Jahre	entfällt	entfällt	entfällt

Aus Sicht der Betreiber würden sich im Zeitablauf die hybridbedingten Mehrkosten gemäß diesem Modell dann wie folgt entwickeln:



**Abbildung 73: Kumulierte Mehrkosten für Hybridfahrzeug im Nutzungszeitraum - mit Förderung für Busse im jeweiligen Beschaffungsjahr**  
(Beispiel Hybrid Solo 4)

### 10.2.4 Empfehlungen

Das Prüfprogramm „Effizienz-, Kosten- und Einsatzanalyse für den Linienbetrieb von Diesel-Hybridbussen“ wurde für drei Zielgruppen durchgeführt:

- BMUB als Auftrag- bzw. Fördermittelgeber,
- Verkehrsunternehmen und
- Fahrzeughersteller.

Entsprechend können Empfehlungen für diese Zielgruppen aus den durchgeführten Untersuchungen abgeleitet werden.

#### *Fördermittelgeber*

Mit Blick auf die gegenüber dem Vorgängerprüfprogramm um durchschnittlich 10 % höhere Verfügbarkeit und die mehrheitlich über 20% liegende Kraftstoffeinsparung kann das Hybridbusförderprogramm des BMUB als wirksames Instrument zur Marktstimulation für diese Technologie angesehen werden. Durch die Schaffung einer fortgesetzten Nachfrage nach der noch jungen Hybridantriebstechnik konnte diese weiter entwickelt und damit ein wesentlicher Beitrag zur Erlangung der Marktreife geleistet werden. Nicht zuletzt auch im Hinblick auf die Brückenfunktion für weitere rein-elektrische Antriebstechnologien stellt die Hybridantriebstechnik eine innovative Möglichkeit dar, Treibhausgase und Schadstoffemissionen im busbasierten ÖPNV wirksam zu mindern. Um auf den bisher erzielten Erfolgen aufzubauen und die dargestellten Potenziale, z.B. jährliches Einsparpotenzial von 40.000 t Treibhausgasen bei einem Anteil der Hybridbusse von 10% an der deutschen Stadtbusflotte, mit Hilfe einer stärkeren Marktdurchdringung zu heben, wird eine Fortsetzung der Förderung der Beschaffung von Hybridbussen empfohlen.

Entsprechend den Ergebnissen dieses Prüfprogramms zeigt sich, dass speziell die Wirtschaftlichkeit bei den aktuellen Randbedingungen (Stichwort Dieselpreis und Mehrkosten Fahrzeuganschaffung) nicht gegeben ist, selbst bei einer Berücksichtigung der Umweltkosten. Während die Dieselpreispreise nicht unmittelbar beeinflussbar sind, kann über eine Förderung der Mehrkosten (Anschaffung und ggf. Energiespeichermiete) die Wirtschaftlichkeitslücke zumindest teilweise geschlossen werden. Um nicht zuletzt den Fördermittelbedarf in Grenzen zu halten, bietet sich eine im zeitlichen Verlauf angepasste Förderung der Mehrkosten an. Dies motiviert einerseits Verkehrsbetriebe, die zeitnah die neue Technologie einsetzen wollen mit einer höheren Förderung und stellt andererseits auch einen Anreiz für die Hersteller dar, weiter an einer Reduktion gerade der Anschaffungsmehrkosten zu arbeiten, da letztlich nur so eine für den dauerhaften Erfolg der Technologie erforderliche Marktdurchdringung erreicht werden kann.

Im Sinne einer Erfolgs- bzw. Effektivitätskontrolle der eingesetzten Fördermittel wird darüber hinaus empfohlen, den Einsatz der geförderten Busse wiederum mit einem Prüfprogramm zu begleiten. Denn nur über die im Rahmen eines solchen Prüfprogramms durchgeführten Langzeitdatenerfassung und Analysen zu Bewertungskriterien wie Verfügbarkeit, Energieeffizienz und Wirtschaftlichkeit inkl. Bestimmung der Umweltkosten, lassen sich die Wirkungen der eingesetzten Busse ganzheitlich quantifizieren und bewerten.

Im Hinblick auf den weiter zunehmendem Reifegrad der rein elektrischen Komponenten sind auch vollelektrische Bussysteme inzwischen in Reichweite und werden absehbar nicht mehr als reine F&E-Vorhaben mit Einzelfahrzeugen im Markt vertreten sein. Es wird daher vorgeschlagen neben der bereits erfolgten Berücksichtigung der Plug-In-Hybridbussen einschließlich der zugehörigen Ladeinfrastruktur eine Erweiterung der Förderung auch auf vollelektrische Busse zu prüfen.

Es darf als Erfolg der gezielten Bundes-Förderung der Elektromobilität im ÖPNV gewertet werden, dass sich in diesem Verkehrsegment der Phasenübergang von der Marktvorbereitung zum Markthochlauf so deutlich dokumentiert.

Wichtig ist es nun, den Verkehrsunternehmen, die in hartem Wettbewerb stehen und gleichzeitig Garanten für öffentlichen Verkehr im Rahmen der Daseinsvorsorge sind, auch für die kommenden Herausforderungen das nötige Rüstzeug mitzugeben, um den Innovationpfad der Elektromobilität weiter zu beschreiten und zu gestalten.

### *Verkehrsunternehmen*

Die vorliegenden Ergebnisse des Begleitprüfprogramms belegen die teilweise erheblichen Einsparpotenziale der Technologie hinsichtlich Kraftstoffverbrauch, Treibhausgasen und Schadstoffen gegenüber konventionellen Dieselnbussen und die damit verbundene Reduktion der schädlichen Folgen für Mensch und Umwelt. Ergebnisse anderer Studien zeigen weiterhin eine signifikante Reduzierung der Lärmemissionen auf.

Die durchgeführten Analysen zeigen aber auch, dass vor dem Einsatz von Hybridbussen grundsätzlich geprüft werden sollte, ob die ausgewählten Linien bzw. das Liniennetz signifikante Kraftstoffeinsparungen erwarten lassen bzw. auf welchen Linien diese am größten sind.

Als Eignungskriterien lassen sich, basierend auf den vorhandenen Daten, die Topographie einer Linie sowie die auf ihr gefahrenen mittleren Reisegeschwindigkeiten benennen. Dabei überwiegt, mit Ausnahme der Parallelhybride mit Batterie, der Einfluss der Topographie: Speziell ein hoher Anteil längerer ununterbrochener Steigungs- und Gefällestrecken mit stärkerer Neigung, sog. kritischer Steigungen, wirkt sich ungünstig aus. Demnach ist ein vorteilhafter Einsatz von Hybridbussen auf Linien mit den Topografieklassen T1 bis T2, d.h. Linien ohne bzw. mit einem niedrigen Anteil an längeren und steileren Steigungen, zu erwarten. Parallelhybride können nach den bisher verfügbaren Daten auch bei anspruchsvollerer Topografie (T3) gute Einsparungen erzielen. Weiterhin sind tendenziell höhere Einsparungen auf Linien mit niedrigeren durchschnittlichen Reisegeschwindigkeiten erzielbar, wobei hier im Einzelfall zwischen den verschiedenen Antriebstechnologien zu differenzieren ist. Das im Rahmen des Begleitprogramms entwickelte Softwaretool zur Beschaffungsoptimierung von Nahverkehrsbussen dient hier als Orientierungshilfe für interessierte Verkehrsunternehmen und liefert dem Anwender erste Anhaltspunkte hinsichtlich z.B. zu erwartender Kraftstoffeinsparungen und Betriebskosten.

Die Verfügbarkeit der Hybridbusse ist mittlerweile annähernd vergleichbar mit der Verfügbarkeit von konventionellen Dieselnbussen. Im Hinblick auf die Verfügbarkeit von hybridspezifi-

schen Ersatzteilen ist im Einzelfall noch mit einer längeren Lieferzeit zu rechnen, wobei gegenüber dem Vorgängerbegleitprogramm eine Verbesserung der Ersatzteilverfügbarkeit zu beobachten ist.

Während sich für die Inbetriebnahme von Hybridbussen keine höheren Aufwendungen für den Betreiber abzeichnen, ist für eine möglichst reibungslose Einführung der Technologie in den Betriebsablauf eine enge Abstimmung mit dem Fahrzeughersteller ratsam. Dies schließt die Abstimmung der Schulung des Fahr- und Wartungspersonals explizit mit ein. Gerade hinsichtlich der Akzeptanz der neuen Technologie im Unternehmen zeigen die bisherigen Erfahrungen, dass die Durchführung von dezidierten Schulungen die Akzeptanz positiv beeinflusst. Insbesondere im Hinblick auf die Erreichung optimaler Ergebnisse hinsichtlich Kraftstoffersparung, d. h. energieeffizientem Fahren, wirken sich umfassende Schulungsmaßnahmen positiv aus.

### *Bushersteller*

Aus Herstellersicht gilt es, die Wettbewerbsfähigkeit der Hybridtechnologie weiter zu verbessern, da nur so die Technologie mittel- und langfristig erfolgreich am Markt bestehen und mit ihr eine Marktdurchdringung in relevanten Umfang erzielt werden kann.

Hier bedarf es zusätzlicher Anstrengungen zur weiteren Reduktion der Mehrkosten des Fahrzeuges sowie einer weiteren Steigerung der Energieeffizienz. Die Gesamtkostenbetrachtungen des Begleitprogramms können als Anhaltspunkt für einen möglichen Zielkorridor für die Fahrzeugmehrkosten dienen. Dieser liegt bei aktueller 35%iger Förderung der Anschaffungsmehrkosten – abhängig vom Finanzierungsmodell des Energiespeichers und dem aktuellen Kraftstoffpreis – bei etwa 0 bis 60 T€, zzgl. etwaiger, vom Betreiber ggf. als noch akzeptabel erachteter Mehrkosten. Selbst bei zusätzlicher Berücksichtigung der vermiedenen externen Umweltkosten wäre noch eine Reduzierung der Fahrzeugmehrkosten um mindestens 30% erforderlich: Die Berücksichtigung der Umweltkosten reduziert zwar die Kostendifferenz merklich, nichtsdestotrotz sind die betriebswirtschaftlichen Mehrkosten zunächst einmal vom Busbetreiber aufzubringen. Nicht zuletzt die vermiedenen Umweltkosten rechtfertigen die aktuelle (Teil-)Förderung durch die öffentliche Hand; bis zu welchem Grad die vermiedenen Umweltkosten gegebenenfalls eine noch höhere Förderung durch die öffentliche Hand ermöglichen, bleibt abzuwarten. Die Erlangung der Wettbewerbsfähigkeit ist daher möglichst unabhängig von eventuellen (Zusatz-)Förderungen zu realisieren, da die Technologie mittelfristig voraussichtlich mit reduzierter bzw. ohne Förderung auskommen muss.

Im Hinblick auf die Verfügbarkeit bieten sich herstellerspezifisch noch Potenziale, um die technische Zuverlässigkeit weiter zu verbessern, gerade im Bereich der nicht unmittelbar hybridantriebsbezogenen Ausfallgründe. Hier empfiehlt es sich für die Hersteller, die aufgetretenen Probleme genauer zu analysieren und entsprechende Gegenmaßnahmen in der Produktion nachfolgender Fahrzeuge zu veranlassen. Die weitere Verbesserung der Ersatzteilverfügbarkeit, speziell bei den Hybridantriebskomponenten inkl. der nun elektrisch angetriebenen Hilfsaggregate ist ebenfalls der Steigerung der Verfügbarkeit dienlich.

Verbesserungspotenziale scheinen für einige Hersteller noch im Bereich der After-Sales-Betreuung und im technischen Kundendienst zu bestehen, wobei dies keine explizit hybridbezogenen Probleme sein müssen.

Als weitere zukünftige Entwicklungsaufgabe empfiehlt sich eine (vom Fahrpersonal gewünschte) vereinheitlichte Signalisierung hybridspezifischer Eigenschaften (Speicherinhalt, effizientes Fahren) in das Anzeigekonzept des Fahrerarbeitsplatzes. Darüber hinaus gilt es, die vom Fahrpersonal beobachteten Einschränkungen im Anfahr- und Beschleunigungsverhalten bei parallelen und seriellen Solobussen zu minimieren oder im Idealfall zu eliminieren.

## 11 Literaturverzeichnis

- [ACTUATE 2013] Advanced Training and Education for Safe Eco-driving of Clean Vehicles, [www.actuate-ecodriving.eu](http://www.actuate-ecodriving.eu); Trainingsmaterial 2013: ACTUATE\_Training\_Material\_Presentation\_Hybrid.pdf
- [AG Bus, 2013] AG Innovative Antriebe Bus - Gemeinsame Arbeitsgruppe zu innovativen Antrieben im straßengebundenen ÖPNV. Arbeitspapier BMVBS und BMU. Berlin März 2013
- [Aktiv Bus] Aktiv Bus Flensburg: Verbrauchstest Mercedes-Benz O 530 G vs. Volvo 7900 AH Hybrid
- [BMUB, 2014] Richtlinie zur Förderung der Anschaffung von diesel-elektrischen Hybridbussen im öffentlichen Nahverkehr vom 12. Dezember 2014. Förderprogramm der Nationalen Klimaschutzinitiative
- [DWD, 2015] Deutscher Wetterdienst: aktuelle und historische Temperaturdaten für ausgewählte Wetterstationen vom CDC FTP-Server <ftp://ftp-cdc.dwd.de/pub/CDC/>
- [EFBEL, 2015] Ergebnisse aus Abgasemissionsmessungen vom TÜV Nord mittels PEMS im VRR und Lärmemissionsmessungen des ika, RWTH Aachen im Rahmen des EFBEL Projektes. Gefördert durch BMVI. Aachen/ Essen, 2015.
- [Faltenbacher et al, 2011] Abschlussbericht Plattform Innovative Antriebe Bus. FKZ 03KP5001, im Auftrag des BMVBS. Echterdingen, 2011.
- [GaBi, 2015] Thinkstep: GaBi Software und Datenbanken zur Ganzheitlichen Bilanzierung. Stuttgart, Echterdingen, 1992 - 2015.
- [HBEFA, 2014] Handbuch Emissionsfaktoren für den Strassenverkehr Version 3.2. Infrac, Bern, 2014.
- [Knote 2011] T. Knote: Linienanalyse RegioHybrid, im Auftrag der VerkehrsConsult Dresden-Berlin GmbH, September 2011
- [Klimaatlas] Deutscher Wetterdienst: Deutscher Klimaatlas, [www.dwd.de/klimaatlas](http://www.dwd.de/klimaatlas), Zugriff vom 15. 9. 2014
- [MAN Handbuch] MAN: Handbuch Hybrid-Technologie
- [MAN 2014] Seminarangebot MAN [www.entry.man.eu/man/media/content\\_medien/doc/business\\_websites\\_suisse\\_1/service\\_training\\_center/SemAngService\\_DE\\_2014.pdf](http://www.entry.man.eu/man/media/content_medien/doc/business_websites_suisse_1/service_training_center/SemAngService_DE_2014.pdf)
- [MVV] Pressemitteilungen zu Hybridbussen:  
 Pilotprojekt Hybridbus MVV-Regionalbuslinie 220, 2011 – 2014  
 Pilotprojekt Hybridbus MVV-Regionalbuslinie 210, 2011 – 2014  
 Pilotprojekt Hybridbus MVV-Regionalbuslinie 266, 2011 – 2014  
 Hybridbus MVV-Regionalbusverkehr 210, Evaluierungsbericht 09/2008 – 12/2010  
[www.mvv-muenchen.de/de/aktuelles/presse/pressemitteilungen](http://www.mvv-muenchen.de/de/aktuelles/presse/pressemitteilungen), Zugriff vom 7. 12.2014
- [Öko-Institut et al, 2012] ARGE: Öko-Institut, Arepo Consult, FFU, Ecologic Institut, Fifo Köln, Dr. Hans-Joachim Ziesing: Evaluierung des nationalen Teils der Klimaschutzinitiative des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit; Zusammenfassung Endbericht 2012, Kennzeichen 03KSE009. Berlin, 2012
- [Statistisches Bundesamt, 2015] Statistisches Bundesamt, Daten zur Energiepreisentwicklung (Preise bei Abgabe an Großverbraucher)

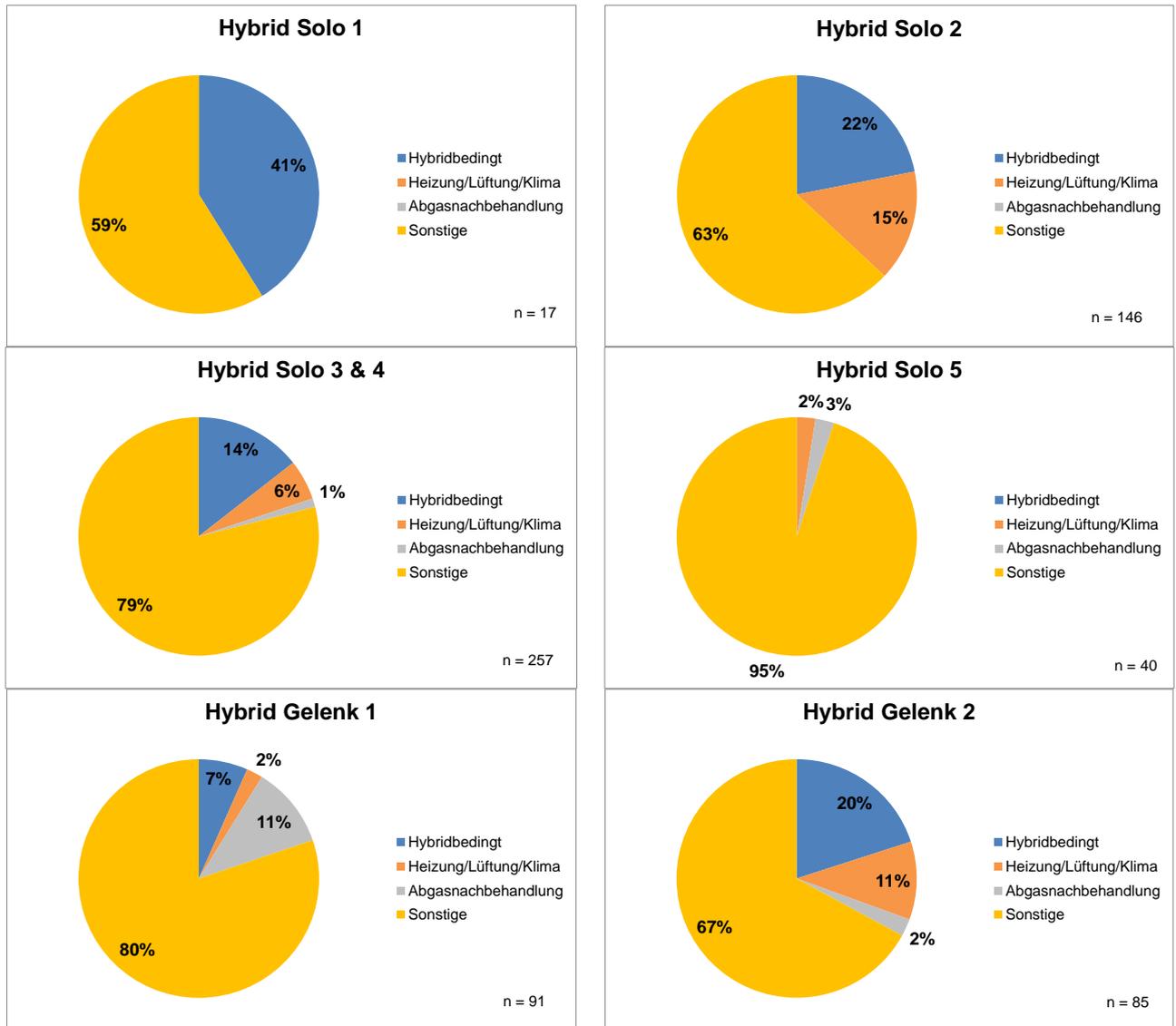
- [TÜV NORD et al., 2012] Begleitende Prüfprogramm zum BMU-Förderprogramm „Hybridbusse für einen umweltfreundlichen ÖPNV“, im Auftrag des BMU. Abschlussbericht. Essen, 2012
- [UBA, 2012] Ökonomische Bewertungen von Umweltschäden: Methodenkonvention 2.0 zur Schätzung von Umweltkosten. Berlin, 2012
- [UBA, 2014] Schätzung der Umweltkosten in den Bereichen Energie und Verkehr. Empfehlungen des Umweltbundesamtes. Berlin, 2014
- [UBA, 2015] Ifeu und TU Graz: Zukünftige Maßnahmen zur Kraftstoffeinsparung und Treibhausgasminde- rung bei schweren Nutzfahrzeugen. UBA Texte 32/2015. Berlin, 2015
- [UITP, 2009] UITP Project „SORT“ Standardised On-Road Test cycles, 2<sup>nd</sup> edition. Brussels, 2009
- [Zumsteg 2012] Ch. Zumsteg: Erfahrungen mit 12m-Volvo Hybridbus. Vortrag, VöV Fachtagung KTBB v. 26.-27. April 2012, Fribourg; [www.voev.ch](http://www.voev.ch)
- [Zumsteg 2014] Ch. Zumsteg: Erfahrungen Volvo Diesel-Hybridbusse. Vortrag, VöV Fachtagung KTBB v. 21.-22. Mai 2014, Fribourg; [www.voev.ch](http://www.voev.ch)



Tabelle 26: Grunddaten Referenzfahrzeuge

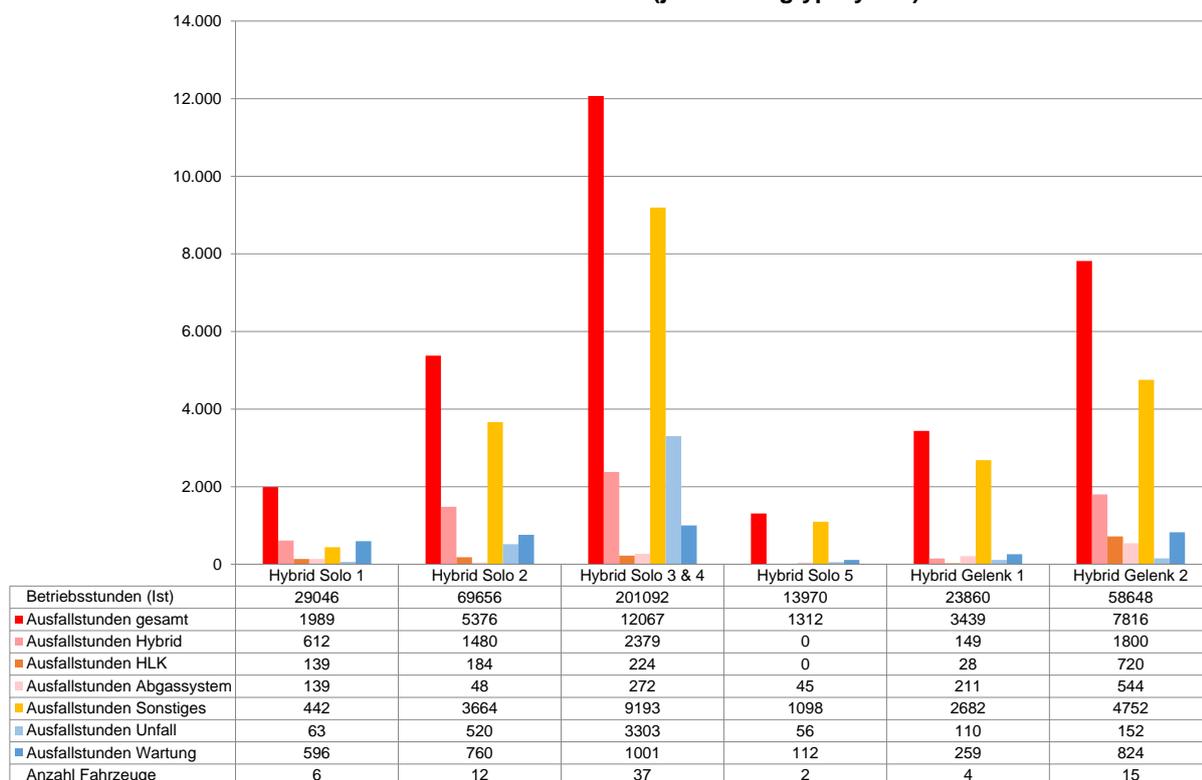
Stadt	Unternehmen	betriebl. Nr.	amt. Nr.	Hersteller	Typ	Abgasnorm (z.B. Euro 5, EEV)	Länge [m]	Kommunikationsanlage (mit Funk, ELA, RBL, IBS, IBS-Enter)	Fahrkartenverkaufs-systeme	Haltestellenanzeigen (ggf. Bildschirm)	Fahrziel- u. Fahrgast-zähl-systeme	Vidüber-wachung	Einsteige-hilfe (elektrisch)	Vollklima-tisierung (Fahrerplatz u. Fahrerplatz) (Anzahl) / (Leistung in kW)	Ausstatt-ung (Aufklima-tisierung, Klimageräte (elektrisch, z.B. für Fahrerplatz) (Anzahl) / (Leistung in kW))	Zusatz-herzgerät (Anzahl) / (Leistung in kW)	zusätzliche Wärme-dämmung (z.B. Doppel-verglasung)	Zusätzliche Fahrgastür (3./4./5. Tür Solo/Gelenk/ Doppelgelenk)	Abgasnach-behandlungs-systeme (z.B. CRT)	AdBlue-erforderlich	Zusatztank für Heizung (z.B. Heizöl)	Einsatz (siehe auch Fragebogen zur Streckenauswahl) Einsatz-geplant auf Linie Nr.	Einsatz-Durch-schnitts-geschwin-digkeit (km/h)	Ersatz-zulassung	Ausson-derung (oder geplante Nutzungsdauer)
IN	SBI	342	IN-VG 342	IMAN	A21 Lion's City	EEV	12 m	X	X	X	X	X	X	1/24	-	1/35	-	X	X	-	-	10/11/X12	20,1	552 14.12.2009	31.12.2021
H	üstra	8431	HHV 431	IMAN	A23 Lion's City	EEV	18 m	X	X	X	X	X	X	1/35	-	1/35	-	X	X	-	-	121	17,7	378 02.08.2011	01.08.2023
H	üstra	8432	HHF 432	IMAN	A23 Lion's City	EEV	18 m	X	X	X	X	X	X	1/35	-	1/35	-	X	X	-	-	Netz	22,2	563 23.09.2011	01.09.2023
H	üstra	8433	HHF 433	IMAN	A23 Lion's City	EEV	18 m	X	X	X	X	X	X	1/35	-	1/35	-	X	X	-	-	Netz	22,2	563 23.09.2011	01.09.2023
H	üstra	7951	HHV 951	Solaris	Urbino 12	EEV	12 m	X	X	X	X	X	X	-	-	1/30	-	X	X	X	X	Netz	22,2	563 23.06.2011	01.06.2021
H	üstra	7952	HHF 952	Solaris	Urbino 12	EEV	12 m	X	X	X	X	X	X	-	-	1/30	-	X	X	X	X	Netz	22,2	563 23.06.2011	01.06.2021
WOB	WVG	k.A./k.A.		IMAN	A21 Lion's City	Euro 6	12 m	X	X	X	X	X	X	3/24	-	1/35	-	X	X	X	X	Netz	26,5	733 01.09.2014	k.A.
HH	HHA	k.A./k.A.		Evobus	Claro	Euro 6	12 m	X	X	X	X	X	X	1/32	-	1/30	-	X	X	X	X	Netz	19,6	426	k.A.
HH	HHA	k.A./k.A.		Evobus	Claro G	Euro 5	18 m	X	X	X	X	X	X	1/36	-	1/35	-	X	X	X	X	Netz	19,6	426	k.A.
HH	HHA	k.A./k.A.		Evobus	Claro G	Euro 5	18 m	X	X	X	X	X	X	1/36	-	1/35	-	X	X	X	X	Netz	19,6	426	k.A.
HH	HHA	k.A./k.A.		Evobus	Claro G	Euro 5	18 m	X	X	X	X	X	X	1/36	-	1/35	-	X	X	X	X	Netz	19,6	426	k.A.
HH	HHA	k.A./k.A.		Evobus	Claro G	Euro 5	18 m	X	X	X	X	X	X	1/36	-	1/35	-	X	X	X	X	Netz	19,6	426	k.A.
HH	HHA	k.A./k.A.		Evobus	Claro G	Euro 6	18 m	X	X	X	X	X	X	1/36	-	1/35	-	X	X	X	X	Netz	19,6	426	k.A.
HH	HHA	k.A./k.A.		Evobus	Claro G	Euro 6	18 m	X	X	X	X	X	X	1/32	-	1/30	-	X	X	X	X	Netz	20,2	462 24.02.2011	k.A.
HH	Jasper	8160	HH-JA 4180	Evobus	Claro	Euro 5	12 m	X	X	X	X	X	X	1/32	-	1/30	-	X	X	X	X	Netz	20,2	462 24.02.2011	k.A.
HH	Jasper	8161	HH-JA 4181	Evobus	Claro	Euro 5	12 m	X	X	X	X	X	X	1/32	-	1/30	-	X	X	X	X	Netz	20,2	462 24.02.2011	k.A.
HH	Jasper	8162	HH-JA 4182	Evobus	Claro	Euro 5	12 m	X	X	X	X	X	X	1/32	-	1/30	-	X	X	X	X	Netz	20,2	462 14.03.2011	k.A.
HH	Jasper	8327	HH-JA 1527	Evobus	Claro	Euro 5	12 m	X	X	X	X	X	X	1/32	-	1/30	-	X	X	X	X	Netz	20,2	462 19.02.2010	k.A.
HH	Jasper	8336	HH-JA 2776	Evobus	Claro	Euro 5	12 m	X	X	X	X	X	X	1/32	-	1/30	-	X	X	X	X	Netz	20,2	462 08.03.2010	k.A.
HH	Jasper	8354	HH-JA 854	Evobus	Claro	Euro 5	12 m	X	X	X	X	X	X	1/32	-	1/30	-	X	X	X	X	Netz	20,2	462 27.04.2011	k.A.
HH	Jasper	8382	HH-JA 1182	Evobus	Claro	Euro 5	12 m	X	X	X	X	X	X	1/32	-	1/30	-	X	X	X	X	Netz	20,2	462 27.04.2011	k.A.
HH	SBG	8295	HH-SE 1145	Evobus	Claro	Euro 5	12 m	X	X	X	X	X	X	1/32	-	1/30	-	X	X	X	X	Netz	21,8	463 19.02.2010	k.A.
HH	SBG	8296	HH-SE 1126	Evobus	Claro	Euro 5	12 m	X	X	X	X	X	X	1/32	-	1/30	-	X	X	X	X	Netz	21,8	463 19.02.2010	k.A.
HH	VHH	1201	HHH-X 3386	Evobus	Claro 530	Euro 5	12 m	X	X	X	X	X	X	1/30	-	1/35	-	X	X	X	X	Netz	19,4	400 01.03.2012	01.03.2022

## Anhang B Auswertungen Ausfallgründe nach Fahrzeugtyp



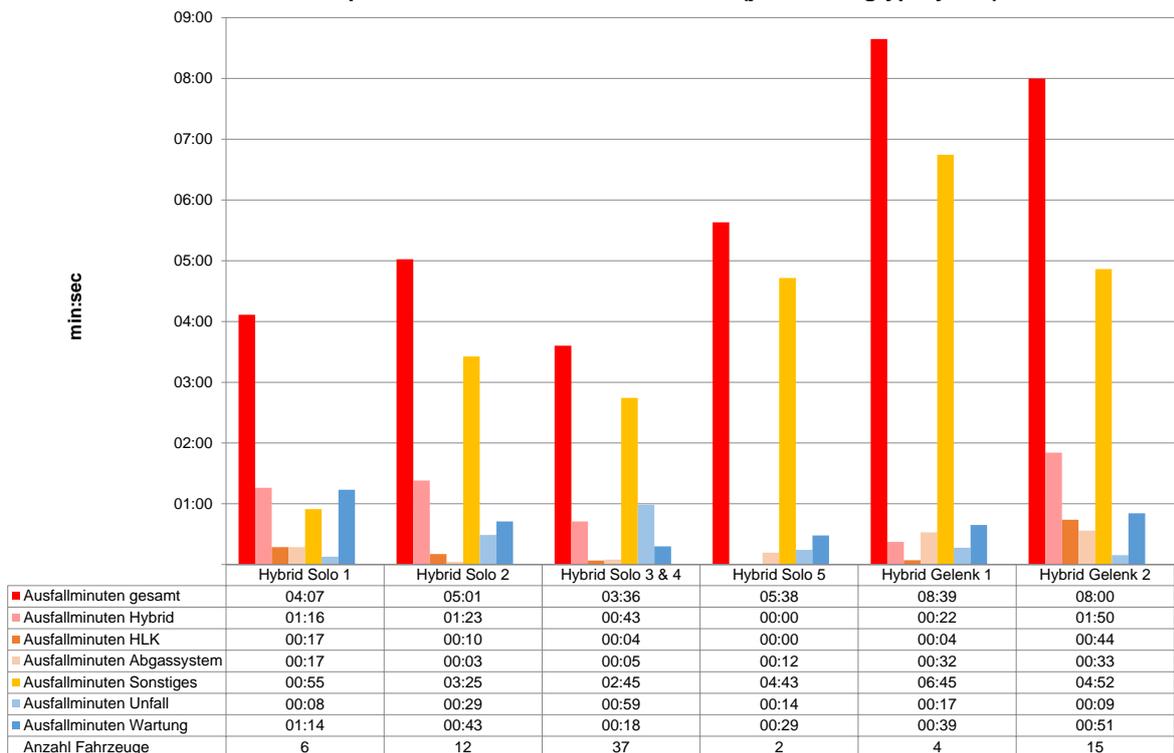
Nachfolgend werden die Ausfallzeiten je Fahrzeugtyp aufgeführt. Dabei ist zu beachten auf wie viele Fahrzeuge sich die Ausfallzeiten bzw. auf wie viele Betriebsstunden sich die Angaben beziehen.

Ausfallstunden nach Ursachen (je Fahrzeugtyp Hybrid)



Zur weiteren Veranschaulichung wurden die Ausfallzeiten auf die Anzahl der Betriebsstunden je Fahrzeugtyp bezogen (siehe nächste Abbildung). Dabei zeigt sich, dass die beiden 18 m Fahrzeuge die höchsten Ausfallzeiten je Betriebsstunde ausweisen, gefolgt vom Solo Hybrid 5. Die übrigen 12 m Hybrid Busse liegen auf einem vergleichbaren Niveau.

**Ausfallminuten pro Betriebsstunde nach Ursachen (je Fahrzeugtyp Hybrid)**



Grundsätzlich ist bei der Analyse dieser Daten die Breite der Datenbasis zu berücksichtigen. Mit Abstand am meisten Betriebsstunden weisen der Hybrid Solo 3 & 4 auf, gefolgt von Hybrid Solo 2 und dem hybrid Gelenk 2. Mit einigem Abstand folgen der Hybrid Solo 1 und der Hybrid Gelenk 1. Die wenigsten Betriebsstunden weist schließlich der Hybrid Solo 5 auf, da sich hier eben nur 2 Fahrzeuge in der Datenerfassung befinden.

## Anhang C Typberichte

Nachfolgend geben die Typberichte nochmals einen kurzen Überblick zu den betrachteten Fahrzeugen.

Fahrzeugbeschreibung	MAN Lion's City Hybrid 	Solaris Urbino 12 Hybrid 
Fahrzeughersteller Traktionsausrüster genaue Typbezeichnung Baujahr Fahrzeugbestand (alle VU)	MAN Truck & Bus AG, München (D) MAN/Siemens AG, München (D) MAN Lion's City A37 Hybrid 2013/2014 6	Solaris Bus & Coach S.A., Poznan (PL) Eaton Corporation Plc, Dublin (IRE) Solaris Urbino 12 Hybrid II 2013 9
<b>Technische Daten:</b> Fahrzeugmaße (L/B/H) Leermasse zul. Gesamtgewicht Anzahl Achsen davon angetrieben Sitz-/Stehplätze Höchstgeschwindigkeit Elektrische Traktionsmotoren Energieerzeugung Dieselmotor Energieerzeugung Generator Energiespeicher	11.980/2.500/3.300 mm 12.600 kg 18.000 kg 2 1 37/49 79 km/h 2 Drehstrom-Asynchronmotoren mit je 75 kW 184 kW 150 kW Doppelschichtkondensatoren (Ultracaps)	12.000/2.550/3.250 mm 11.230 18.000 2 1 30/70 80 km/h Dreiphasen-Wechselstrom-Elektromotor mit 26-44 kW 162 kW -- Lithium-Ionen-Batterien (Li-Ion)
<b>Charakteristik</b>	12 m Niederflur-Standardbus mit 3 Fahrgasttüren Serieller Hybridantrieb	12 m Niederflur-Gelenkbus mit 3 Fahrgasttüren Paralleler Hybridantrieb
<b>Produktgeschichte</b>	<p>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 testweise 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.</p>	<p>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 2008 produziert. Zwischenzeitlich sind auch 18-m-Hybridbusse mit anderen Traktionsausrüstern erhältlich. Der Solaris Urbino 12 mit einer Traktionsausrüstung von Eaton wurde im Jahr 2009 erstmalig präsentiert. Seit 2014 ist Solaris auch mit rein elektrischen Bussen (12 und 18 Meter) am Markt vertreten.</p>
<b>Betriebsdaten</b>		
Einsatzfeld Durchschnittliche Laufleistung pro Fz. und Monat Durchschnittliche Verfügbarkeit (%) Durchschnittliche Verfügbarkeit Hybrid (%)	SORT 2 4.857 km 94,14% 97,89%	SORT 2 6.965 km 91,31% 100,00%

	Volvo 7700 Hybrid	Volvo 7900 Hybrid
<b>Fahrzeugbeschreibung</b>		
Fahrzeughersteller	Volvo Bussar AB, Göteborg (SE)	Volvo Bussar AB, Göteborg (SE)
Traktionsausrüster	Siemens AG, München (D)	Siemens AG, München (D)
genaue Typbezeichnung	7700 H	7900 H
Baujahr	2011	2013-2014
Fahrzeugbestand (alle VU)	12	37
<b>Technische Daten:</b>		
Fahrzeugmaße (L/B/H)	12.074/2.520/3.216 mm	12.084/2.550/3.224 mm
Leermasse	12.020 kg	ca. 12.100 kg
zul. Gesamtgewicht	18.900 kg	19.000 kg
Anzahl Achsen	2	2
davon angetrieben	1	1
Sitz-/Stehplätze		
Höchstgeschwindigkeit	80 km/h	80 km/h
Elektrische Traktionsmotoren	I-SAM Permanentmagnet-Motor mit 120 kW	I-SAM Permanentmagnet-Motor mit 120 kW
Energieerzeugung Dieselmotor	161 kW	161 kW
Energieerzeugung Generator	--	--
Energiespeicher	Lithium-Ionen Akkumulatoren (Li-Ion)	Lithium-Ionen Akkumulatoren (Li-Ion)
<b>Charakteristik</b>	12 m Niederflur-Standardbus mit 2 Fahrgasttüren Paralleler Hybridantrieb	12 m Niederflur-Standardbus mit 3 Fahrgasttüren Paralleler Hybridantrieb
<b>Produktgeschichte</b>	Volvo Busse verfügt über acht Jahre Erfahrung in der Produktion von Hybridbussen. Der Volvo 7700 war das erste Fahrzeug, welches in der 12-m-Version als Parallel-Hybrid angeboten wurde. Das Nachfolgemodell Volvo 7900 wurde von vornherein ausschließlich als Hybridfahrzeug auf den Markt gebracht, sowohl in der Solo- als auch in der Gelenkversion. Inzwischen ist der 7900 H auch als Plug-In-Hybrid erhältlich. Das Modell 7700 H war/ist von 2008 bis 20XX am Markt.	Volvo Busse verfügt über acht Jahre Erfahrung in der Produktion von Hybridbussen. Der Volvo 7700 war das erste Fahrzeug, welches in der 12-m-Version als Parallel-Hybrid angeboten wurde. Das Nachfolgemodell Volvo 7900 wurde von vornherein ausschließlich als Hybridfahrzeug auf den Markt gebracht, sowohl in der Solo- als auch in der Gelenkversion. Inzwischen ist der 7900 H auch als Plug-In-Hybrid erhältlich. Das Modell 7900 H ist seit 2011 am Markt.
<b>Betriebsdaten</b>		
Einsatzfeld	(SORT 1,) SORT 2	(SORT 1,) SORT 2
Durchschnittliche Laufleistung pro Fz. und Monat	4.167 km	4.005 km
Durchschnittliche Verfügbarkeit (%)	91,64%	92,33%
Durchschnittliche Verfügbarkeit Hybrid (%)	97,88%	98,66%

Fahrzeugbeschreibung	Solaris Urbino 18 Hybrid	Volvo 7900 Hybrid 18
Fahrzeughersteller Traktionsausrüster genaue Typbezeichnung Baujahr Fahrzeugbestand (alle VU)	Solaris Bus & Coach S.A., Poznan (PL) Allison Transmission Inc., Indianapolis (USA) Solaris Urbino 18 Hybrid II 2011/2013 20	Volvo Bussar AB, Göteborg (SE) Siemens AG, München (D) 7900 H18 2014 15
<b>Technische Daten:</b> Fahrzeugmaße (L/B/H) Leermasse zul. Gesamtgewicht Anzahl Achsen davon angetrieben Sitz-/Stehplätze Höchstgeschwindigkeit Elektrische Traktionsmotoren Energieerzeugung Dieselmotor Energieerzeugung Generator Energiespeicher	18.000/2.550/3.250 mm 17.500 28.000 3 1 48/94 80 km/h 2 Drehstrom-Asynchronmotoren mit je 75 kW 180,5 kW -- Nickel-Metallhydrid-Batterien (NiMH)	18.134/2.550/3.280 mm 18.200 kg 29.000 kg 3 2 80 km/h I-SAM Permanentmagnet-Motor mit 150 kW 177 kW -- Lithium-Ionen Akkumulatoren (Li-Ion)
<b>Charakteristik</b>	18 m Niederflur-Gelenkbus mit 3 Fahrgasttüren Leistungsverzweigter Hybridantrieb	18 m Niederflur-Standardbus mit 4 Fahrgasttüren Paralleler Hybridantrieb
<b>Produktgeschichte</b>	<p>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 2008 produziert. Zwischenzeitlich sind auch 18-m-Hybridbusse mit anderen Traktionsausrüstern erhältlich. Der Solaris Urbino 12 mit einer Traktionsausrüstung von Eaton wurde im Jahr 2009 erstmalig präsentiert. Seit 2014 ist Solaris auch mit rein elektrischen Bussen (12 und 18 Meter) am Markt vertreten.</p>	<p>Volvo Busse verfügt über acht Jahre Erfahrung in der Produktion von Hybridbussen. Der Volvo 7700 war das erste Fahrzeug, welches in der 12-m-Version als Parallel-Hybrid angeboten wurde. Das Nachfolgemodell Volvo 7900 wurde von vornherein ausschließlich als Hybridfahrzeug auf den Markt gebracht, sowohl in der Solo- als auch in der Gelenkversion. Inzwischen ist der 7900 H auch als Plug-In-Hybrid erhältlich.</p> <p>Das Modell 7900 H18 ist seit 2014 am Markt.</p>
<b>Betriebsdaten</b>	Einsatzfeld Durchschnittliche Laufleistung pro Fz. und Monat Durchschnittliche Verfügbarkeit (%) Durchschnittliche Verfügbarkeit Hybrid (%)	(SORT 1,) SORT 2 3.831 km 87,44% 96,93%

## Anhang D Auswertung Inbetriebnahme

	Betreiber 1	Betreiber 2	Betreiber 3	Betreiber 4	Betreiber 5	Betreiber 6	Betreiber 7
1. Welche Fahrzeugunterlagen hat die zuständige Zulassungsbehörde zur Zulassung abverlangt?	Handelsregisterauszug, Vollmacht, Personalausweis GF/PPA, Gutachten zur Erlangung einer Einzelgenehmigung, Antrag Steuerbefreiung, Versicherung, Kaufvertrag (Rechnung)	Vollmacht, Kopie Personalausweis vom Geschäftsführer, Versicherungsnummer, Fahrzeugrechnung, Zulassungs-Dokumente Volvo, Handelsregisterauszug	Die üblichen Unterlagen, wie für jeden anderen KOM auch, Keine zusätzlichen Unterlagen. Kiz-Brief, Versicherungsbestätigung und §13 EG-FGV (Deckungszusage), EU-Konformitätsklärung, Bankverbindung	HDN-Nummer, Fahrzeugbrief, Gutachten Erlangung Einzelgenehmigung, Untersuchungsbericht und §13 EG-FGV	TÜV- Gutachten, Kaufvertrag	Fahrzeugbrief, Fahrzeugdatenblatt, EVB-Nummer	
2. Musste bei der Zulassung eine Fahrzeugrechnung vorgelegt werden? ja 1, nein 0	1	1	1	0	0	1	0
3. Musste eine Verzollung von Fahrzeugen vor der Zulassung erfolgen? ja 1, nein 0	0	0	0	0	0	0	0
4. Gab es Unregelmäßigkeiten bei der Zulassung der Fahrzeuge? ja 1, nein 0 falls ja, spezifizieren	0	0	0	0	0	0	0
5. Erfolgte die Inbetriebnahme der Fahrzeuge innerhalb des Unternehmens nach einem besonderen Abnahmeprotokoll? ja 1, nein 0	1	0	0	1	1	1	0
6. Wie viele Stunden wurden für die Gesamteinbetriebnahme pro Fahrzeug angesetzt? ca. h				16 (1 tag, 2 Mann)	5	4	6
7. Wurde für den Hybridteil des Fahrzeuges eine gesonderte Inbetriebnahme durchgeführt? ja 1, nein 0	1	0	0	0	0	0	1
8. Wie viele Stunden wurden hierfür angesetzt? ca. h							3
9. Erfolgte eine elektrotechnische Abnahme des Fahrzeuges nach berufsständischen Grundsätzen? ja 1, nein 0				0	0	0	0
10. Wurde durch den Hersteller eine elektrotechnische Abnahme durchgeführt und protokolliert? ja 1, nein 0				evtl., keine Kenntnis	0	1	0
11. Wurden die entsprechenden Nachweise durch den Hersteller geliefert? ja 1, nein 0	1	0	0	0	0	1	0
12. Erfolgte eine Abnahme nach den Grundlagen einer Hauptuntersuchung oder Sicherheitsprüfung? ja 1, nein 0	1	1	1	durch Hersteller	1	1	0
13. Erfolgte eine Abnahme des Fahrzeuges nach § 42 BOKraft? ja 1, nein 0	1	1	1	Verzicht gem. § 43 (2) BOKraft	0	1	0

	Betreiber 1	Betreiber 2	Betreiber 3	Betreiber 4	Betreiber 5	Betreiber 6	Betreiber 7
			Sec	Sec			
14. Erfolgte eine Abnahme des Fahrzeuges nach BG-Vorschriften? ja 1, nein 0					0	0	1
15. Wurde für das Fahrzeug eine Gefahrenbeurteilung/ein Sicherheitsblatt erstellt? ja 1, nein 0			keine separate f. Hybridbus				
16. Wie erfolgte die Arbeitsschutzbelehrung vor der Aufnahme der ersten Tätigkeiten am Fahrzeug? Unterweisung der Mitarbeiter		1	die Mitarbeiter wurden vom Fahrzeughersteller unterwiesen und ausgebildet		0	0	1
17. Welche Mängel wurden bei der Inbetriebnahme festgestellt, a) im allgemeinen Fahrzeugteil			keine Lackschäden im Innenraum	fehlende Reserveantenne Datenfunk, Aussenlautsprecher ohne Funktion, Nachlauf Aussenanzeige 10 statt 3 min., Kabelbrüche	Herstellerunterweisung	Schulung der Handwerker durch Hersteller, Einweisung der Fahrer durch eigene ausgebildete Mitarbeiter	Schulung durch den Fahrzeughersteller und internes fachkundiges Personal
b) im Hybridteil		keine	keine	keine Angaben, da dieses die vertraglich zugesicherte Vereinbarung über Stillschweigen zwischen Hersteller und Kunden betrifft	keine Angaben, da dieses die vertraglich zugesicherte Vereinbarung über Stillschweigen zwischen Hersteller und Kunden betrifft	Heizungen brachten keine ausreichende Heizleistung, sehr laute Innengeräusche, verbunden mit spürbaren Vibrationen, Leistungsdefizite, die die Erhaltung der Fahrzeugen gefährden.	keine
18. Konnten die kundenspezifischen Anlagen (z. B. Kasse, Entwerter, Anzeigen, RBL, Fahrgastinformationsanlagen, Blindeninformationsanlagen u.ä.) ohne zusätzliche ja 1, nein 0						Beim Umschalten von Elektro- auf Dieselantrieb entstehen Leistungslücken	
19. Falls nein - wie hoch waren die zusätzlichen Aufwendungen? ca. h							

## Anhang E Auswertung Ersatzteilversorgung (Hersteller)

	Hersteller 3	Hersteller 2	Hersteller 1
<b>A Strategie bei der Ersatzteilversorgung</b>			
1. Wie gestalten Sie die Versorgung der Verkehrsunternehmen mit hybridspezifischen			Leider stellte der Hersteller keine Informationen zur Verfügung
Eigenes Zentrallager ja 1, nein 0	1	1	
Eigene regionale Distributionslager ja 1, nein 0	1	0	
Zentrallager durch externen Distributionspartner ja 1, nein 0	1	0	
Regionallager durch externe Distributionspartner ja 1, nein 0	0	0	
Konsignationslager beim Kunden ja 1, nein 0	0	0	
Einzelabforderung von Komponenten bei Traktionsausrüster/Zulieferer bei Bedarf ja 1, nein 0	0	0	
Sonstige ja 1, nein 0	0	1	
Erläuterung Sonstige (Freitext)		Via Hersteller eigene o. private Reparatur- und Werkstattbetriebe	
2. Weicht die Ersatzteilversorgung mit hybridspezifischen Komponenten von der übrigen Ersatzteilversorgungsstrategie Ihres Unternehmens ab?			
ja 1, nein 0	0	0	
inwiefern?			
Erläuterung (Freitext)			
3. Welche Bereitstellungszeiträume für hybridspezifische Komponenten garantieren Sie?			
_____ Tage ab Anforderung	30		
4. Kann dieser Zeitraum in der Regel eingehalten werden?			
ja 1, nein 0	1		
<b>B Ersatzteil-Komponenten</b>			
5. Welche hybridspezifischen Komponenten werden dauerhaft zur Auslieferung bereitgehalten und in welcher Menge?			
Erläuterung (Freitext)	Batterielüfter	Sämtliche Komponenten werden bereitgehalten in Mengen die den Bedarf entspricht	
Stück	2		
Erläuterung (Freitext)	Filters		
Stück	76		
Erläuterung (Freitext)	Geschwindigkeitsensor		
Stück	2		
Erläuterung (Freitext)	Kupplungen		
Stück	2		
Erläuterung (Freitext)			
Stück			
Erläuterung (Freitext)			
Stück			
Erläuterung (Freitext)			
Stück			
Erläuterung (Freitext)			
Stück			
6. Hält Ihr Unternehmen komplette Hybrid-Antriebssysteme als Ersatzkomponenten vor?			
ja 1, nein 0	0	1	
nämlich			
Stück			
7. Hält Ihr Unternehmen Traktionsenergiespeichersysteme (oder Teile davon) als			
ja 1, nein 0	0	1	
nämlich			
Batteriepacks / -module ja 1, nein 0		1	
Batteriekühlsysteme ja 1, nein 0		1	
Steuerungsgeräte / Batteriemanagementsysteme ja 1, nein 0		1	
SuperCaps / Hochleistungskondensatoren ja 1, nein 0		0	
Sonstige ja 1, nein 0		0	
Erläuterung Sonstige (Freitext)			
8. Welche Ersatzteile wurden bislang bei Hybridbussen am häufigsten angefordert?			
Erläuterung (Freitext)	Kupplungszyylinder	Wartungsteile, z.B. für Standheizung und Türe	
Erläuterung (Freitext)	Batterielüfter	Hybridspezifische Teile werden nicht sehr häufig angefordert	
Erläuterung (Freitext)	Geschwindigkeitsensoren		
Erläuterung (Freitext)	Filters		
Erläuterung (Freitext)	Getriebemodulen		
Erläuterung (Freitext)			
Erläuterung (Freitext)			
Erläuterung (Freitext)			
9. Empfiehlt Ihr Unternehmen die zusätzliche standardmäßige Vorhaltung bestimmter Komponenten beim Kunden?			
ja 1, nein 0	0	0	
nämlich			
Erläuterung (Freitext)			

## Anhang F Auswertung Rein elektrisches Fahren

fett = Frage VU und Hersteller	MAN		Solaris		VOLVO		
	Bezeichnung Fahrzeugtyp Erläuterung (Freitext)	12	Solaris Urbino 12 Hybrid	18	Solaris Urbino 18 Hybrid	12	18
1. <b>Bezeichnung Fahrzeugtyp</b> Erläuterung (Freitext)	MAN Lion's City Hybrid	12	Solaris Urbino 12 Hybrid	18	Solaris Urbino 18 Hybrid	Volvo 7700 H	Volvo 7900 H
2. <b>Art des Hybridantriebs</b>		1		3			
3. <b>Weicher Traktionsenergiespeicher wird auf dem Fahrzeug eingesetzt?</b> Erläuterung (Freitext)	Hochleistungskondensator ("UltraCap")	1	Lithium-Ionen-Akkumulator	NiMH-Akkumulator		LiFePo4	LiFePo4
4. <b>Welche nominale Kapazität besitzt der Traktionsenergiespeicher?</b> _____ kWh		1	3,6	20		4,8	9,9
5. <b>Bis zu welchem Ladezustand (SOC) wird der Traktionsenergiespeicher genutzt?</b> _____ %		50	20	20		50	45
6. <b>Besteht die Möglichkeit, den Traktionsenergiespeicher aus einer fahrzeugfremden Energiequelle zu laden? (VU3)</b> ja 1, nein 0 <i>nämlich</i> Konduktiv (Stecker - Kabel) ja 1, nein 0 Konduktiv (Pantograph - Partielle Oberleitung) ja 1, nein 0 Konduktiv (Pantograph - Dockingsystem/Lademast) ja 1, nein 0 Induktiv ja 1, nein 0 Sonstige ja 1, nein 0 Erläuterung Sonstige (Freitext)		0	0	0		0	0
7. <b>Ist im Fahrzeug rein elektrischer Fahrbetrieb (Fahren mit abgeschaltetem Dieselmotor) systemseitig vorgesehen? (vgl. VU 5)</b> ja 1, nein 0		1	0			1	1
8. <b>Besteht die Möglichkeit, den Anteil des rein elektrischen Fahrens mit dem Fahrzeug zu ermitteln?</b> <i>nämlich</i> bezogen auf die Fahrstrecke ja 1, nein 0 bezogen auf die Fahrzeit ja 1, nein 0 Sonstige ja 1, nein 0 Erläuterung Sonstige (Freitext)		1				1	1
		1				1	1
		1				1	1
		1				1	1
		0				0	0

	MAN	Scania	VOLVO
<p><b>9. In welchen Situationen ist rein elektrischer Fahrbetrieb vorgesehen? (vgl. VU 6)</b>                      Nur beim Anfahren aus der Haltestelle ja 1, nein 0                      Nach jedem Fahrzeugstillstand ja 1, nein 0                      Unabhängig von Fahrzeugstillständen, auch während der Fahrt ja 1, nein 0                      Sonstige Situationen ja 1, nein 0                      Erläuterung Sonstige (Freitext)</p>	0 0 1 1 beim Ein- und Ausfahren aus der Haltestelle	1 1 0 0	1 1 0 0
<p><b>10. Wie weit kann das Fahrzeug im rein elektrischen Fahrbetrieb fahren? (vgl. VU 7)</b>                      ca. 0 - 500 m ja 1, nein 0                      ca. 500 - 1.000 m ja 1, nein 0                      ca. 1.000 - 2.000 m ja 1, nein 0                      ca. ___ m</p>	1 0 0	1 0 0	1 0 0
<p><b>11. Wird der rein elektrische Fahrbetrieb automatisch/systemseitig eingeleitet? (vgl. VU 10)</b></p>	1 ?	1 Abschalten Dieselmotor bei Stillstand (abh. v. Ladezustand), anfahren elektrisch	1 Abschalten Dieselmotor bei Stillstand (abh. v. Ladezustand), anfahren elektrisch
<p><b>12. Kann der rein elektrische Fahrbetrieb durch Eingreifen des Fahrers gezielt eingeleitet werden? ja 1, nein 0 falls ja, Erläuterung (Freitext)</b></p>	0	0 Für Fahrten auf Betriebshof ist mittels Schalter rein elektrisches Fahren möglich, auch unabh. v. Ladezustand	0 Für Fahrten auf Betriebshof ist mittels Schalter rein elektrisches Fahren möglich, auch unabh. v. Ladezustand
<p><b>13. Wurde die Möglichkeit des rein elektrischen Fahrbetriebs von den Betreibern gezielt nachgefragt? (vgl. VU 11)</b>                      ja 1, nein 0</p>	1	0	1
<p><b>14. War die Möglichkeit des rein elektrischen Fahrbetriebs Vergabekriterium in Ausschreibungen (Lastenheft)? (vgl. VU 12)</b>                      ja 1, nein 0</p>	1	0	0

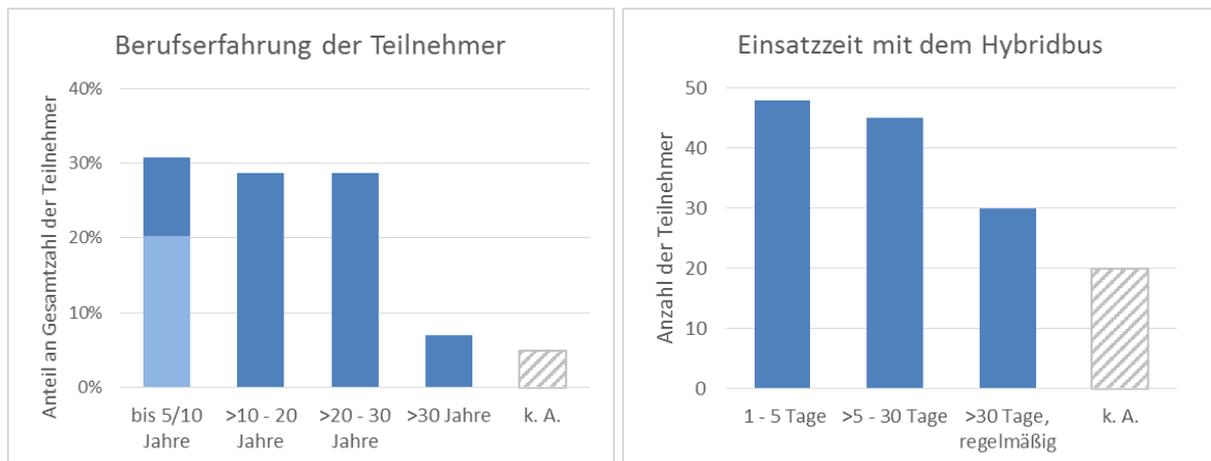
## Anhang G Akzeptanzbefragungen

### Anhang G 1 Bewertung durch die Fahrerinnen und Fahrer

#### Teilnehmerkreis – Berufserfahrung und Schulung – Fragen 1 bis 14

Zur Bewertung der Hybridbusse erhielten die Fahrer und Fahrerinnen schriftlich auszufüllende Fragebögen denen für die anonyme Rücksendung vorbereitete Antwortumschläge beilagen. Falls Verkehrsunternehmen sowohl Solo- als auch Gelenkhybridbusse eingesetzt, wurden fahrzeugspezifische Fragen für beide Fahrzeuggrößen getrennt gestellt. In den Antworten zeigte sich, dass unabhängig von der Gefäßgröße die einzelnen Fahrer die Busse bei gleichem Hersteller und gleicher Hybridtechnologie meist gleich bewerteten. In den folgenden Darstellungen werden die Bezeichnungen für die Fahrzeuge mit HG1, HG2 für die Hybridgelenkbusse und HS1 bis HS5 für die Solobusse abgekürzt. Falls in der Bewertung Fahrzeugvarianten nicht unterschieden wurden, werden die Fahrzeuge jeweils unter dem Kürzel des Solofahrzeugs aufgeführt.

Im Unterschied zu den Befragungen der vorangegangenen Hybridbus-Begleitprogramme ging der Fragebogen stärker auf die hybridbuspezifische Ausbildung des Fahrpersonals und den Themenkreis elektrisches bzw. energieeffizientes Fahren ein. Insgesamt sendeten 143 Fahrer und Fahrerinnen ihre Antworten ein. Diese Personen verfügten in der Mehrzahl über eine lange Berufserfahrung und waren beinahe ebenso lange in dem derzeitigen Verkehrsunternehmen eingesetzt. Jedoch ist auch die Gruppe der jüngeren Fahrer vertreten. Der Anteil der bis 5 Jahre im Beruf tätigen Personen liegt bei 20 % (im Diagramm heller dargestellt).



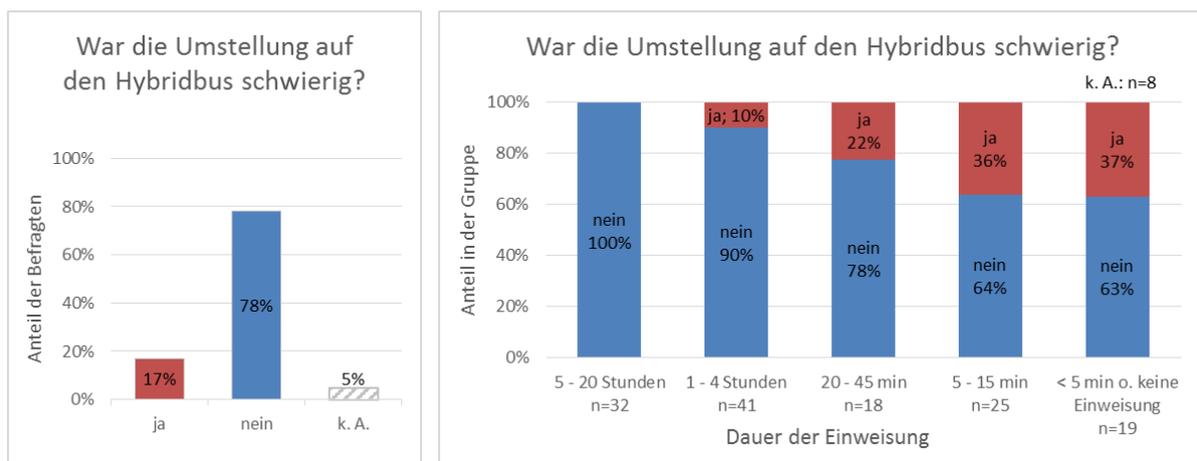
**Abbildung 74: Fragen 1 u. 3 – Berufserfahrung und Erfahrung mit dem Hybridbus**

Reichlich drei Viertel der Befragten gaben an, dass der Wechsel zum Hybridbus nicht schwierig gewesen sei, während 17 % dabei Schwierigkeiten empfanden. Unabhängig von dieser Einstufung wurde beschrieben, dass folgende Punkte eine Umstellung des Fahrers erforderten:

- Anlassen und Starten der Hybridfahrzeuge dauern länger,

- deutlich spürbare Schaltpausen und langsames Anfahren und Beschleunigen bei den Parallelhybridbussen,
- Bremsen mit den HG1,
- stärkere Beachtung einer energieeffizienten Fahrweise, bei einem Fahrzeugtyp durch die leicht erfassbare Signalisierung besonders auffällig und überprüfbar,
- Modifikationen im Fahrerarbeitsplatz (bei allen Bussen),
- leise Geräuschkulisse im elektrischen Fahrmodus.

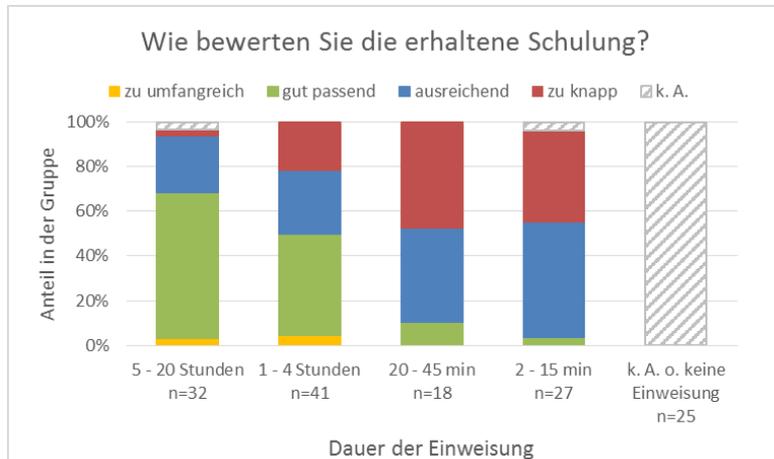
Anteilig gaben Fahrer mit kürzerer Berufserfahrung eher Schwierigkeiten beim Umstieg auf die Hybridbusse an, als solche, die schon über zehn Jahre als Busfahrer arbeiteten. Doch nicht nur die Erfahrung im Führen unterschiedlicher Busse sondern auch die vorbereitenden Unterweisungen für die Besonderheiten der Hybridbusse haben einen wesentlichen Einfluss für den problemlosen Umgang mit den Fahrzeugen. Diesen Zusammenhang verdeutlicht Abbildung 75. Fahrer, welche eine mehrstündige Einweisung erhalten hatten, empfanden die Umstellung auf den Hybridbus in der Regel als nicht schwierig. Im Gegensatz dazu gab reichlich ein Drittel des Fahrpersonals, das weniger als 20 Minuten oder gar nicht unterwiesen wurde, Schwierigkeiten bei der Umstellung an.



**Abbildung 75: Fragen 4 u. 9 – Umstellungsschwierigkeiten und Schulungsdauer**

Ähnlich fiel das Urteil über die Schulung aus. Fahrer, die länger als eine Stunde zum Fahrzeug unterrichtet wurden, beschrieben die Einweisung meist als gut passend. Instruktionen von kürzerer Dauer wurden häufig als zu knapp bewertet. Ein Kommentar drückte Bedauern und Ärger über eine sehr knappe Einführung aus. Zu einer Bewertung mit ausreichend wurde angemerkt, dass Grundkenntnisse vermittelt wurden, den Rest aber die Fahrpraxis bringen müsse. Nur in drei Einzelfällen wurde der Schulungsumfang als zu reichlich angegeben (Schulungsdauer 1 bis 3 Stunden). Die Hybridbuseinweisungen fanden meist vor dem ersten Linieneinsatz statt. Ihre Dauer entsprach den Planungsangaben der Verkehrsunternehmen. Einige Fahrer erhielten eine Auffrischung der Kenntnisse (Praxis oder Theorie) nachdem sie einige Zeit mit dem Hybridbus im Linieneinsatz waren. In vielen Fällen waren die Fahrer aber erst kurze Zeit mit dem Hybridbus unterwegs, so dass eine solche Maßnahme noch nicht sinnvoll gewesen wäre (s. Abbildung 74 rechts).

Handzettel bzw. Handbücher zur Bedienung der Hybridfahrzeuge erhielt rund 70 % des Fahrpersonals. Diese wurden mehrheitlich (61 %) als „hilfreich“ und zu einem Drittel als „zum Teil hilfreich“ eingeschätzt. Einzelne Fahrer hatten sich ihr Fahrzeugwissen im Selbststudium angeeignet, z. T. aus diesen Handreichungen bzw. auch aus anderen Quellen.



**Abbildung 76: Frage 12 – Bewertung der Hybridbusschulung**

Eine Teilnahme an weiteren (allgemeinen) Schulungen zeigte die knappe Hälfte der Fahrer an. Von diesen hatte fast jeder einen Kursus zum sparsamen Fahren absolviert. Anti-Rutschtraining, defensives Fahren und Verhalten an Haltestellen stellten ebenfalls häufig genannte Ausbildungsinhalte dar.

### **Unterschiede im Bedienverhalten und Wechsel zwischen Diesel- und Hybridbus – Fragen 15 bis 17**

War der erste Fragebogenteil vorrangig den Anfangsschwierigkeiten gewidmet, gingen die anschließenden Fragen konkreter auf die Unterschiede in der Fahrzeugbedienung und die Auswirkungen beim Wechsel zwischen Hybrid- und Dieselbus ein. Hier zeigte sich, dass zwar nur für einen kleinen Teil des Fahrpersonals der Umstieg auf den Hybridbus mit Schwierigkeiten verbunden war, jedoch die Mehrzahl der Fahrer Unterschiede im Bedienverhalten feststellte. Wie Abbildung 77 veranschaulicht, werden diese bei HS1 weniger stark empfunden, beim HS5 jedoch besonders stark. Das zeigt sich auch in der Beschreibung der Unterschiede. Hier werden beim HS5 in fast jeder Antwort ruckartige Schaltvorgänge und ähnlich ruckartiges Umschalten des Dieselmotors bemängelt. Bei den anderen Fahrzeugen mit dem gleichen Hybridprinzip wird dieses Verhalten ebenfalls, in einzelnen Antworten auch sehr heftig kritisiert, jedoch scheint es bei den neueren Fahrzeugen in etwas geringerem Maße aufzutreten. Die Antworten zum HS1 widmen sich hingegen häufiger der Frage, wie der Bus besonders energieeffizient gefahren werden kann. Die Antworten zum HG1 geben als Umstellung vor allem eine etwas trägere Fahrweise und die Nutzung des Gaspedals zum Bremsen an. Eine geänderte Nutzung des Gaspedals wird auch für die anderen Hybridbusse beschrieben, ebenso die Notwendigkeit zur Gewöhnung an eine andere, etwas länger dauernde Startprozedur. Eine Zusammenfassung der häufig genannten Bedienungsunterschiede enthält Tabelle 27.

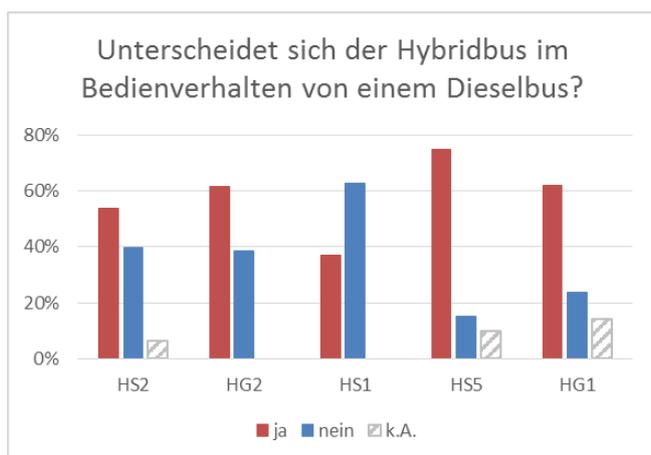


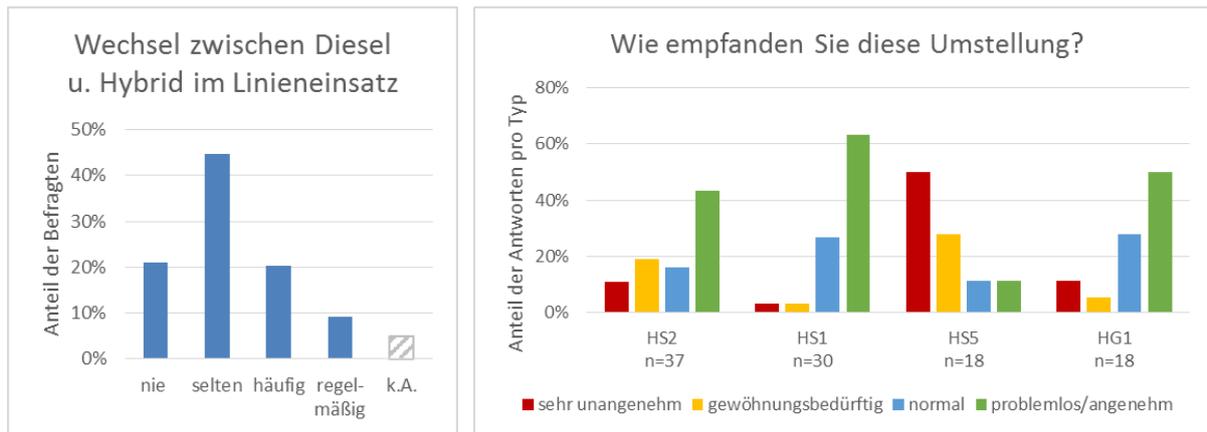
Abbildung 77: Frage 15 – Unterschiede im Bedienverhalten zw. Diesel- und Hybridbus

Tabelle 27: Frage 15 – Ursachen für eine Umstellung des Bedienverhaltens

Umstellung ist erforderlich bei / wegen	HS1	HS2	HS5	HG1
Leistungsunterbrechung beim Schalten u. beim Einsetzen des Dieselmotors	○	X	X	○
Rucken beim Anfahren und Schalten	○	X	X	○
Beschleunigung ist ungenügend; beim Anfahren zu langsam	○	X	X	○
Startprozedur ist anders, dauert länger	x	x	x	x
Fahrzeug ist laut	○	x	x	○
Bremsen – Bedienung des Gaspedals	X	X	X	X
Auf energieeffiziente Fahrweise achten	X	x	○	○
Fahrerplatz: Spiegelanordnung, Türbedienung	○	X	○	○
Fahrverhalten ist anders (träger, Lenkung, Kurvenverhalten)	○	○	○	X

X – Ursache wurde häufig genannt; x – Ursache wurde vereinzelt genannt; ○ - bei diesem Fahrzeugtyp nicht genannt

Ein Fünftel der Fahrer und Fahrerinnen hatte innerhalb eines Einsatztages nie zwischen Diesel- und Hybridbus zu wechseln. Die anderen empfanden den Umstieg zwischen den Fahrzeugen meist als für einen Berufskraftfahrer normal bzw. als gänzlich problemlos. Einige bewerteten den Wechsel sogar als angenehm. (Abbildung 78 rechts zeigt die Zusammenfassung der 105 frei formulierten Antworten.) Im Gegensatz dazu wurde der Umstieg auf den HS5 mehrheitlich als unangenehm bzw. gewöhnungsbedürftig beschrieben, in geringerem Maße auch der Wechsel auf die Fahrzeuge von Hersteller 2.

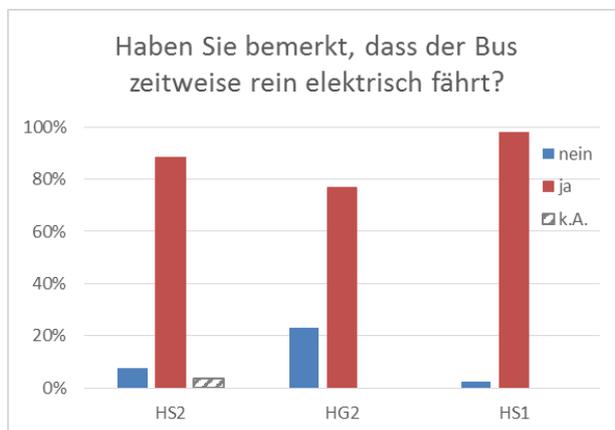


**Abbildung 78: Fragen 16 u. 17 – Wechsel zw. Diesel- und Hybridbus innerhalb eines Einsatztages**

## Fahrverhalten und weitere Merkmale des Hybridbusses – Fragen 18 bis 24 und 37

### Elektrisches Fahren

Die meisten Fahrer und Fahrerinnen beobachteten, dass die Busse in bestimmten Situationen rein elektrisch, also ohne Dieselmotor fahren. Für Hybridbusse, welche nicht elektrisch fahren können wurden in diesem Fragekomplex manchmal Angaben für Fahrzustände gemacht, in denen die Busse ihre Energie vorrangig aus den Batterien beziehen und die sich durch größere Laufruhe und geringere Geräusche auszeichnen. Diese Antworten sind im Folgenden nicht dargestellt.



**Abbildung 79: Frage 18 – Beobachten des rein elektrischen Fahrens**

Häufiges Fahren im rein elektrischen Betrieb wurde vor allem beim Losfahren von Haltestellen und Lichtsignalanlagen festgestellt. Einige Fahrer gaben an, dass die Fahrzeuge in diesen Situationen stets elektrisch fahren.

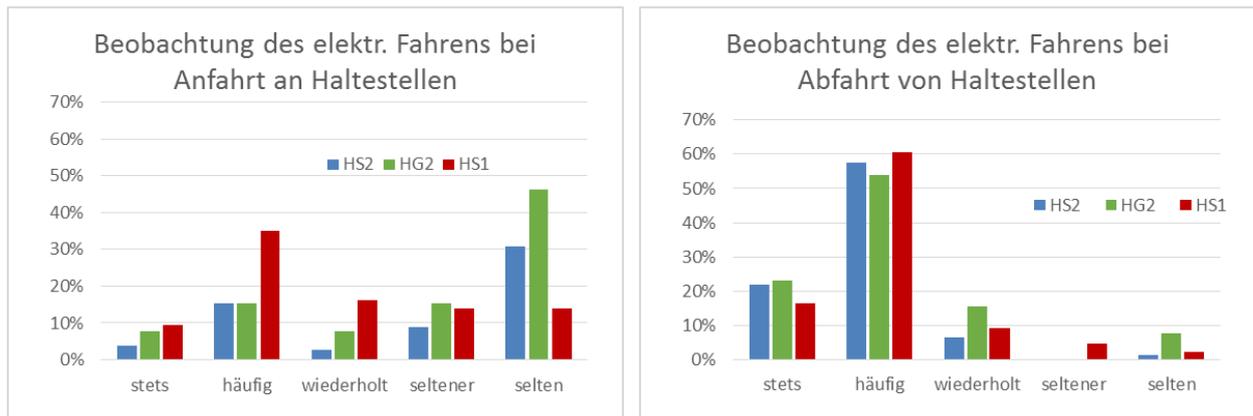


Abbildung 80: Frage 18 – Elektrisches Fahren vor und nach Haltestellen

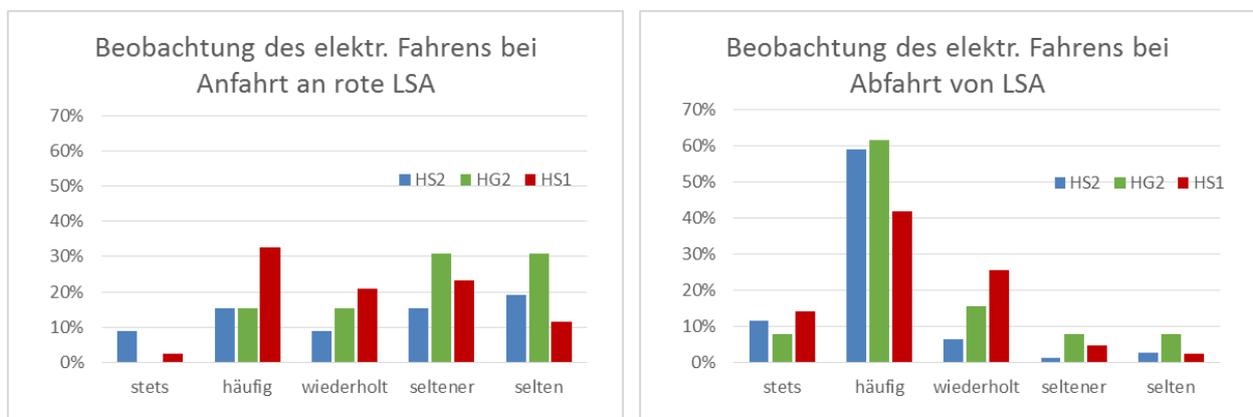


Abbildung 81: Frage 18 – Elektrisches Fahren vor und nach Lichtsignalanlagen

Bei langsamer Fahrt wurde der rein elektrische Betrieb ebenfalls als häufig auftretend geschildert. Die Geschwindigkeitsgrenze für das Zuschalten des Dieselmotors wurde mit etwa 15 bis 30 km/h angegeben.

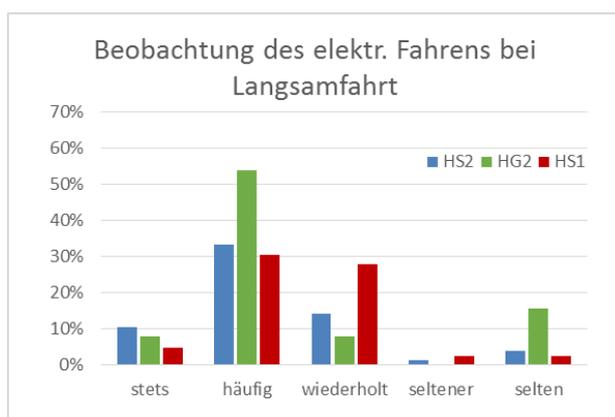
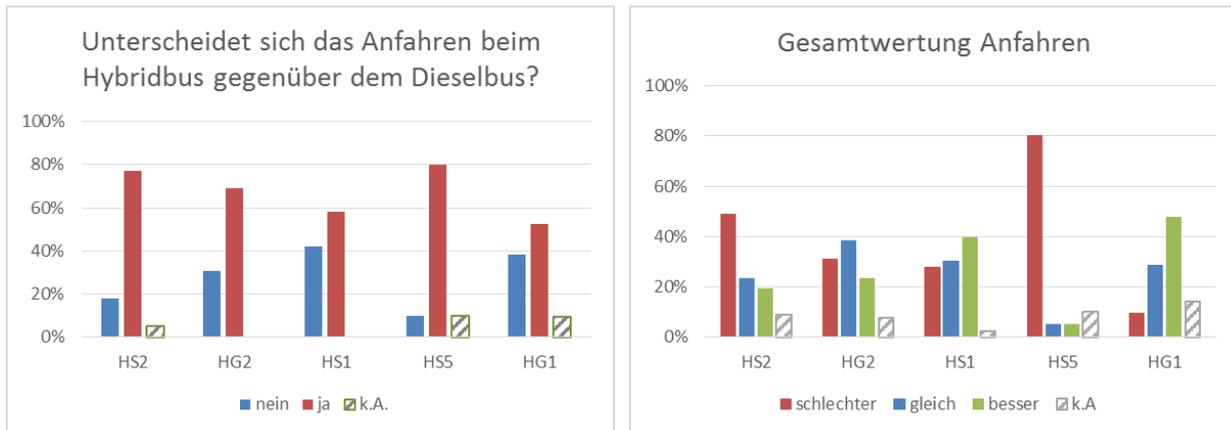


Abbildung 82: Frage 18 – Elektrisches Fahren bei Langsamfahrt

### Anfahren, Beschleunigen,

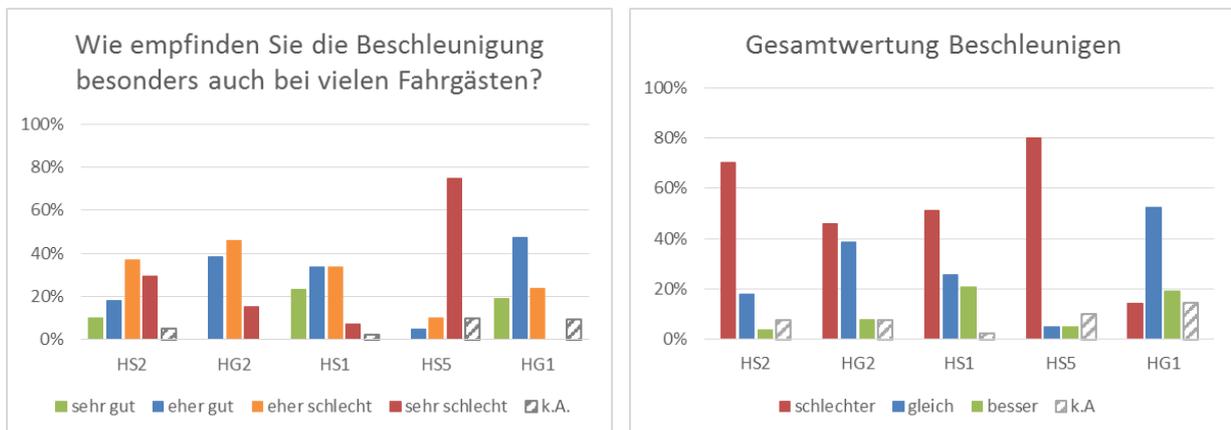
Ein gegenüber konventionellen Dieselmotoren geändertes Anfahrverhalten der Hybridbusse stellte die Mehrzahl der Befragten fest, wobei Unterschiede beim HS1 und beim HG1 seltener angezeigt wurden (Abbildung 83 links). Wie bereits bei den ersten Fragen aufgeführt, wurde der Anfahrvorgang als langsamer beschrieben, besonders bei den Parallelhybriden, bei denen

der Einsatz des Dieselmotors und das Umschalten der Gänge zu kurzen Schubunterbrechungen führte. Diese äußerten sich in ungleichmäßigem, ruckartigem Fahren und waren mit z. T. deutlich hörbaren Geräuschen verbunden. Gleichzeitig wurde allen Hybridbussen (außer HS5) in der Anfangsphase des Anfahrens ein leiseres, gleichmäßigeres, fahrgastfreundliches Fahrverhalten bescheinigt. Einzelne Antworten beschrieben den Anfahrvorgang auch als schneller und zügiger gegenüber Dieselbussen. Das Ergebnis der vergleichenden Gesamtwertung aus Frage 37 zeigt das Diagramm rechts. Es bestätigt die bisherigen Einschätzungen und stellt heraus, ob sich die beschriebenen Unterschiede positiv oder negativ auswirken.



**Abbildung 83: Fragen 19 und 37 – Bewertung des Anfahrverhaltens**

Die beim Anfahrverhalten gegebenen Erläuterungen beinhalten bereits Aussagen zur Beschleunigung der Fahrzeuge. Diese wird mit Ausnahme von HG1 häufig als etwas schlechter gegenüber Dieselbussen eingeschätzt.



**Abbildung 84: Fragen 20 und 37 – Bewertung des Beschleunigungsverhaltens**

Das Beschleunigen mit laufendem Dieselmotor wurde in den Erläuterungen als gleichmäßiger und kräftiger geschildert als in den Situationen, in denen sich der Motor erst zuschaltet. Die Schaltpause sowie die Geräusche und Vibrationen beim Zuschalten des Dieselmotors wurden im Vergleich zum normalen Schalten teilweise als stärker eingeschätzt (Frage 22 betraf nur die dargestellten Fahrzeuge).

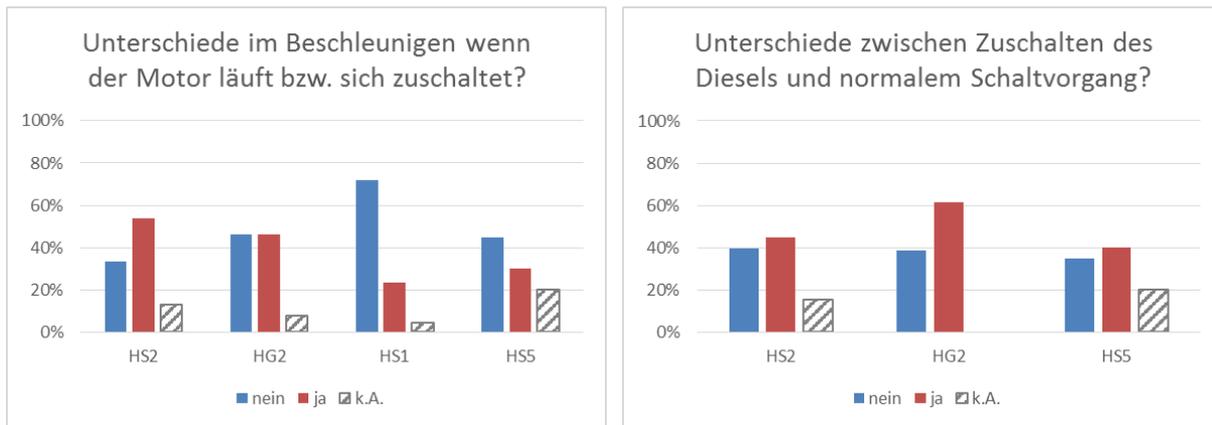


Abbildung 85: Fragen 21 und 22 – Beschleunigungsverhalten mit u. ohne Dieselmotor

Bremsen

Die Kommentare zu Frage 23 beschrieben das Bremsen mit den Hybridbussen (HS5) als sanfter, ruckfrei, gut dosierbar und häufig besser als mit Dieselmussen. Diese Einschätzung äußert sich auch in der Gesamtwertung. Bei den HS1 wurde zusätzlich angemerkt, beim Bremsen auf eine möglichst hohe Energierückspeisung zu achten. Die meisten Fahrer nutzen für Bremsvorgänge lieber das Bremspedal (61%), ca. ein Viertel lieber das Fahrpedal. Die anderen gaben an, keines von beiden vorzuziehen, sondern beide situationsabhängig zu nutzen.

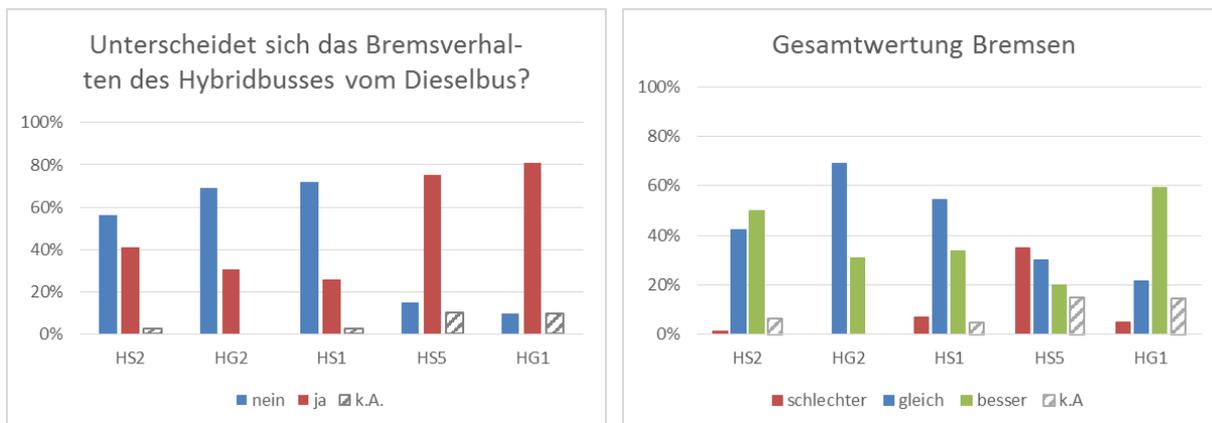


Abbildung 86: Fragen 23 und 37 – Bewertung des Bremsverhaltens

Lenken und sonstiges Fahrverhalten

Im Verhalten der Fahrzeuge bei Geradeausfahrt, beim Lenken und in Kurven wurden selten Unterschiede gegenüber konventionellen Dieselmussen festgestellt (Abbildung 87 und Abbildung 88).

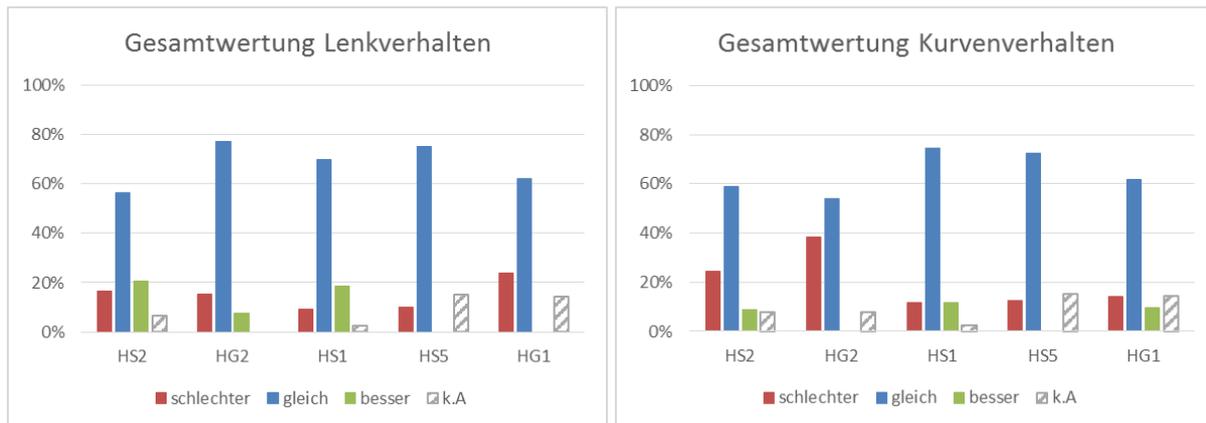


Abbildung 87: Frage 37 – Bewertung des sonstigen Fahrverhaltens

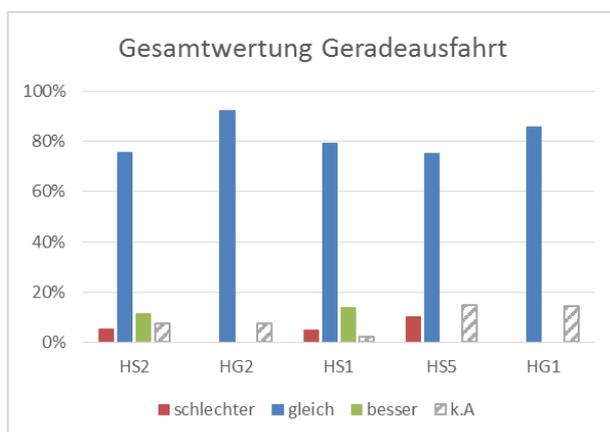


Abbildung 88: Frage 37 – Bewertung des sonstigen Fahrverhaltens

## Ergonomie und Komfort – Fragen 25 bis 35

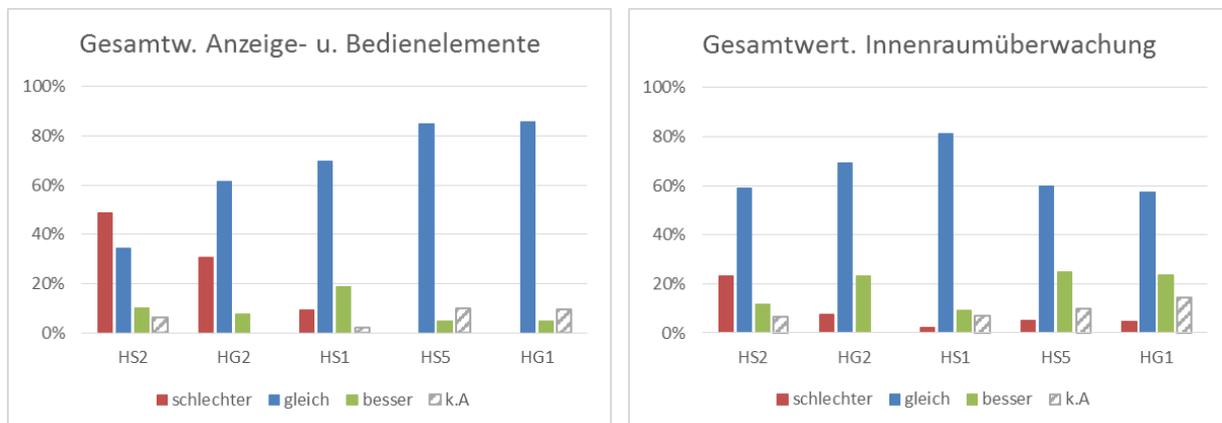
### Fahrerarbeitsplatz

Angaben zum Fahrerplatz wurden sowohl unter Frage 25 als auch am Ende des Fragebogens bei den Hinweisen zur Weiterentwicklung der Fahrzeuge gemacht. Diese frei formulierten Äußerungen werden hier zusammenfassend dargestellt.

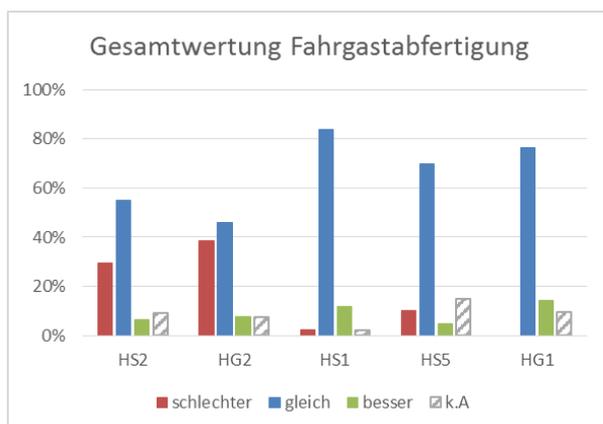
Bei HS5 und HG1 entsprach die Gestaltung des Fahrerumfeldes den Gewohnheiten der Fahrer und wurde folglich als gut und normal bewertet. Das spiegelt sich auch in der zusammenfassenden Beurteilung der Handhabung und Bedienung aus Frage 37 wieder (s. Abbildung 89 und Abbildung 90). Etwas großzügigere Ablagen, ein weiterer Abstand zwischen den Schaltern zum Öffnen und Verriegeln der Türen, eine klarere Belegung der Türtaster sowie das Anbringen einer Fahrgastschranke stellten die einzigen Zusatzwünsche dar.

Der Arbeitsplatz des HS1 wurde in der Mehrzahl der Antworten als gut, normal und übersichtlich bewertet. Wünsche nach mehr und größeren Ablagen (Dienstplan, Fahrertasche, Getränkehalter) und nach besserem Blendschutz (Sonnenrollo) wurden häufiger geäußert, weiterhin auch eine Verbesserung der Heizung (Einstellmöglichkeit und Leistung) angeregt. Getrennte Verstellbarkeit von Pult und Lenkrad sowie die Möglichkeit den Sitz weiter nach hinten zu schieben, bildeten den Gegenstand einiger Antworten.

Den Fahrerplatz der restlichen Busse bewerteten die Befragten in den Kommentaren etwa zur Hälfte als gut und normal zur anderen gaben sie in der Hauptsache kritische Anmerkungen. Die Ursache für die unterschiedliche Bewertung liegt z. T. darin, dass zwei Fahrzeuggenerationen eingesetzt wurden. Bei der neueren wurden wesentliche Verbesserungen am Fahrerplatz bemerkt, u. a. war der vorher beklagte Platzmangel beseitigt worden. Kritische Äußerungen bezogen sich auf die Anbringung und Einstellbarkeit der Spiegel, schlecht erreichbare Schalter (z. B. Türtaster, Funktaster), die Verstellbarkeit von Sitz-Lenker-Pult und den Blendenschutz. Häufig wurden mehr und größere Ablagemöglichkeiten und vor allem eine besser gesicherte Ablage für die Diensttasche gewünscht. Eine stärkere und besser einstellbare Heizung des Fahrerplatzes zählte ebenfalls zu den angeregten Veränderungen. Die Informations- und Bedienelemente wurden gegensätzlich bewertet, zum einen als übersichtlich, zum anderen als überladen und verwirrend. Einige Male wurde auch der Geruch des Fahrzeugs angesprochen und als unangenehm bzw. störend beschrieben.



**Abbildung 89: Frage 37 – Beurteilung der Handhabung und Bedienung**



**Abbildung 90: Frage 37 – Beurteilung der Handhabung und Bedienung**

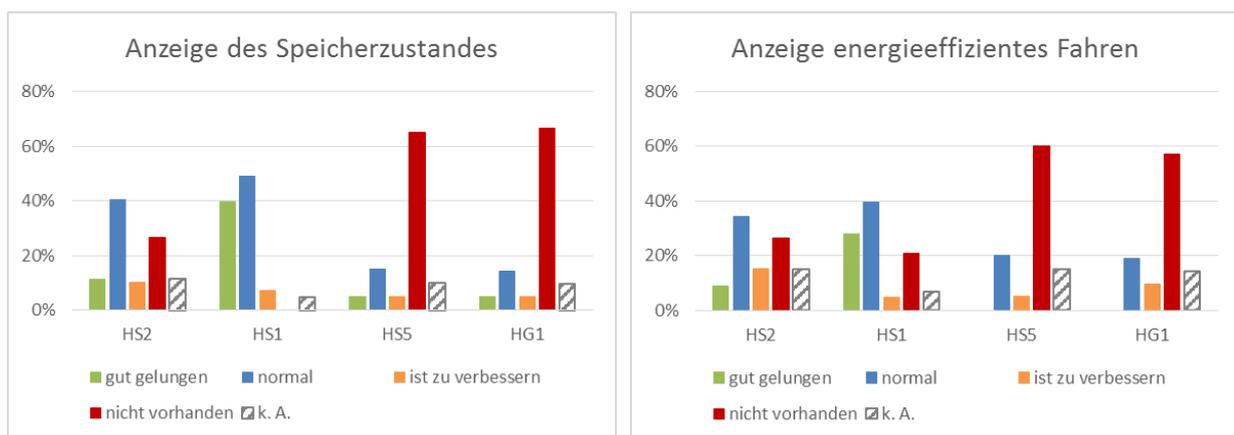
### Anzeige von Speicherzustand und energieeffizienter Fahrweise

Der Ladezustand der Energiespeicher und die Energieeffizienz beim Fahren werden herstellerabhängig ganz unterschiedlich signalisiert. Zum Teil sind diese Anzeigen stets augenfällig sichtbar, zum Teil im Multifunktionsdisplay anwählbar oder sie werden durch ein Zusatzgerät angezeigt. Die Bewertung fiel folglich sehr unterschiedlich aus, zum Teil wurden keine solchen Anzeigen gefunden.

Bei den Fahrzeugen eines Herstellers wurde angemerkt, dass der Speicherzustand nur in einem Untermenü des Displays zu finden sei und die Effizienzanzeige zu klein und teilweise durch das Lenkrad verdeckt sei. Einzelne Fahrer gaben an, solche Informationen nicht zu benötigen, u. a. weil sie befürchteten dadurch vom Fahren abgelenkt zu werden. Andere Fahrer hingegen legten Wert auf deren Signalisierung, z. B. durch positiv belegte Symbole.

Beim HS1 ist die Effizienzanzeige als grüner Bereich für Bremsen und Beschleunigen im linken Rundinstrument hinterlegt und dort nicht zu übersehen. Fahrer, die angaben, dass eine solche Anzeige nicht vorhanden sei, hatten möglicherweise eine detailliertere Auswertung erwartet. Zumal sie unter Frage 28 beschrieben, ihr Fahrverhalten an die Anzeigen angepasst zu haben. Insgesamt wurden beide Anzeigen mehrheitlich als gut gelungen und normal eingeschätzt und die Signalisierung der kraftstoffsparenden Fahrweise durch den grünen Bereich mehrfach gelobt. Bei den Anzeigen im Multifunktionsdisplay wurde die Symbolik nicht immer verstanden. Hier wurde angeregt, höher auflösende Bildschirme zu verwenden, um Vorgänge und Symbole eindeutiger darstellen zu können.

Das aktuelle Ladeverhalten wird bei zwei Fahrzeugen nach den Angaben in den Fragebögen im Fahrgastraum gezeigt, liegt allerdings nicht im Sichtbereich des jeweiligen Fahrers. Insofern ist zu verstehen, dass diese Anzeigen gleichzeitig als gut gelungen und normal oder als nicht vorhanden bzw. verbesserungswürdig bewertet werden.



**Abbildung 91: Fragen 26 und 27 – Bewertung der Anzeigen des Speicherzustands und der Energieeffizienz beim Fahren**

Abbildung 92 zeigt in welchem Maße die Fahrer die Hinweise aus den Anzeigen in ihren Fahrstil eingebunden haben und wie sie die Möglichkeiten, die ihnen der Fahrplan dazu lässt, bewerten.

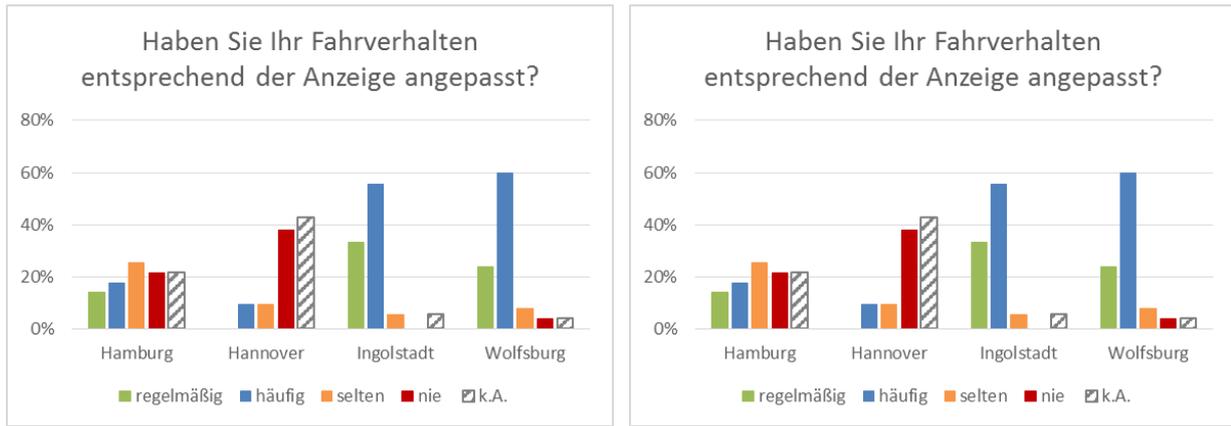


Abbildung 92: Fragen 28 und 29 – Anpassung der Fahrweise und Fahrplanflexibilität

Geräusche und Vibrationen

Die Grundgeräusche im Inneren des Fahrzeugs sowie die Motorgeräusche werden bei den Hybridbussen mit Ausnahme vom HS5 im Vergleich zu Dieselnbussen als leiser empfunden. Fahrzeugspezifische Geräusche führen in der Gesamtbewertung sowohl für die Geräuschbelastung als auch für Vibrationen zu einer schlechteren Bewertung. Andererseits fallen in dem grundsätzlich leiseren Umfeld manche Geräusche, z. B. Lüfter, stärker auf. In der Gesamtbewertung wurden sowohl hinsichtlich der Geräusche als auch der Vibrationen HS1 und HG1 am besten bewertet.

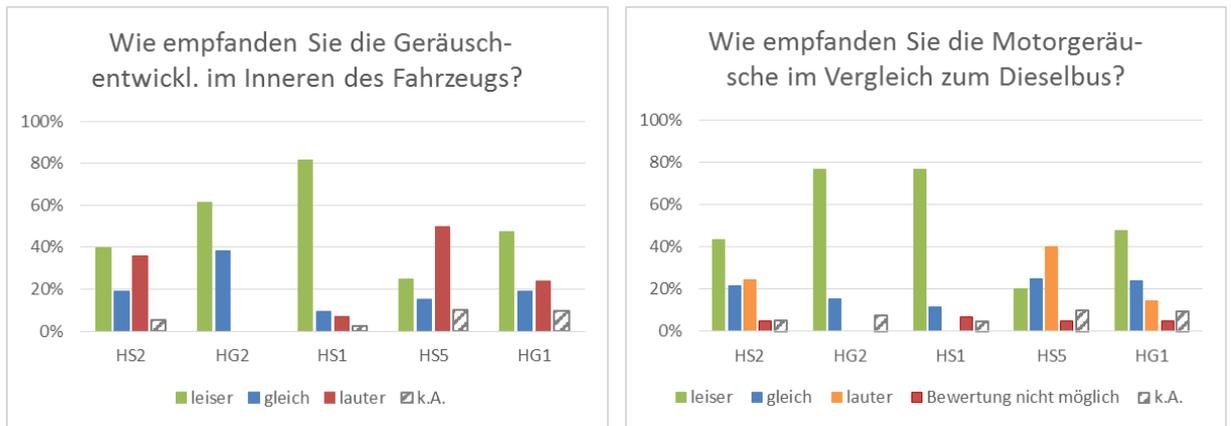


Abbildung 93: Fragen 30 und 32 – Bewertung der Geräusche

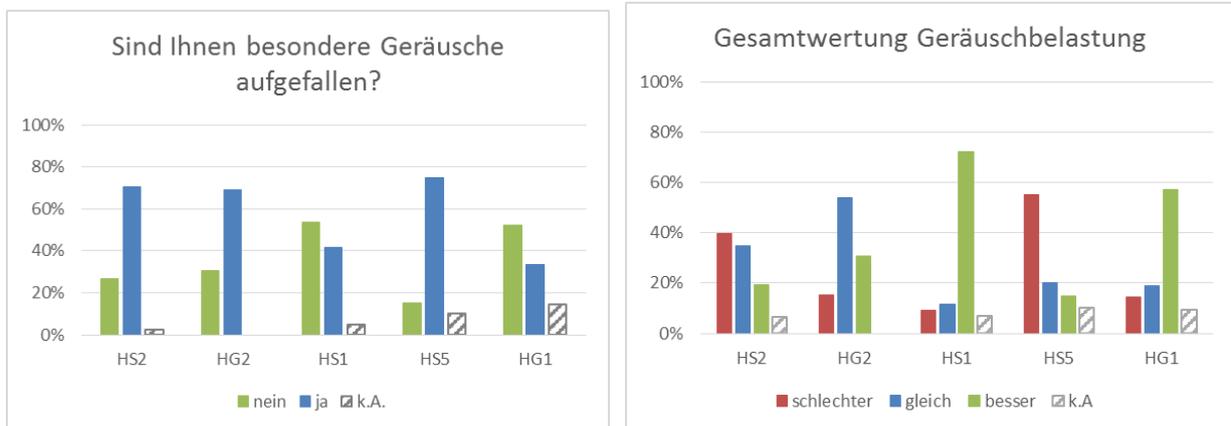


Abbildung 94: Fragen 31 und 37 – Bewertung der Geräusche

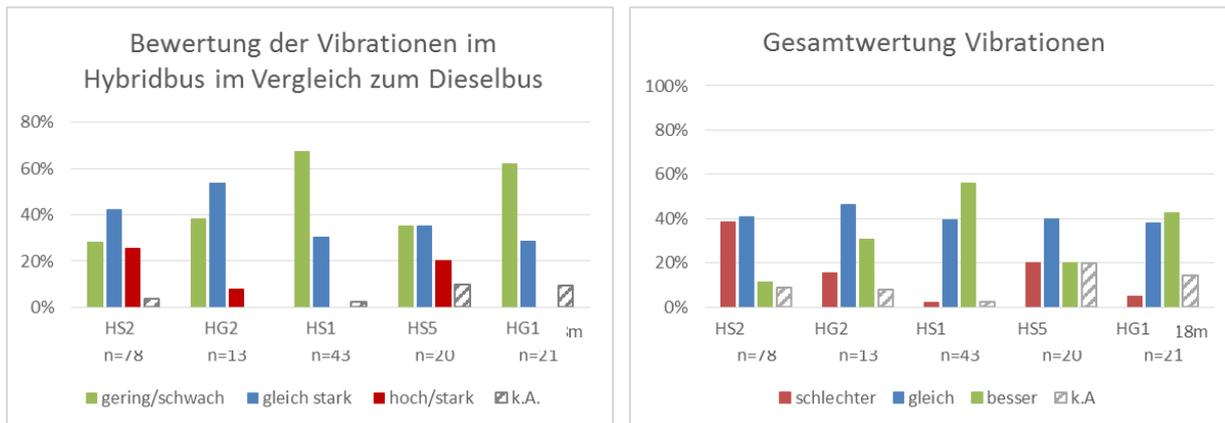


Abbildung 95: Fragen 34 und 37 – Bewertung der Vibrationen

### Klimatisierung

Abhängig vom Befragungszeitpunkt und dem Vorhandensein einer Fahrgast-Klimaanlage, lagen zum Teil nur Erfahrungen zum Heizverhalten vor. Eine zu schwache Heizung für Fahrgäste und Fahrer, deutliche Lüftergeräusche, Beschlagen der Scheiben und schlechte Regulierbarkeit führten bei HS2 und HG2 oftmals zu einer eher schlechten Bewertung. Auch für HS5 und HG1 wurde angegeben, dass die Heizung nicht ausreiche. Beim HS1 wurden hauptsächlich laut und lange laufende Heizungslüfter erwähnt. Die Gesamtwertung der Klimatisierung von Fahrerplatz und Fahrgastraum zeigt Abbildung 96 rechts.

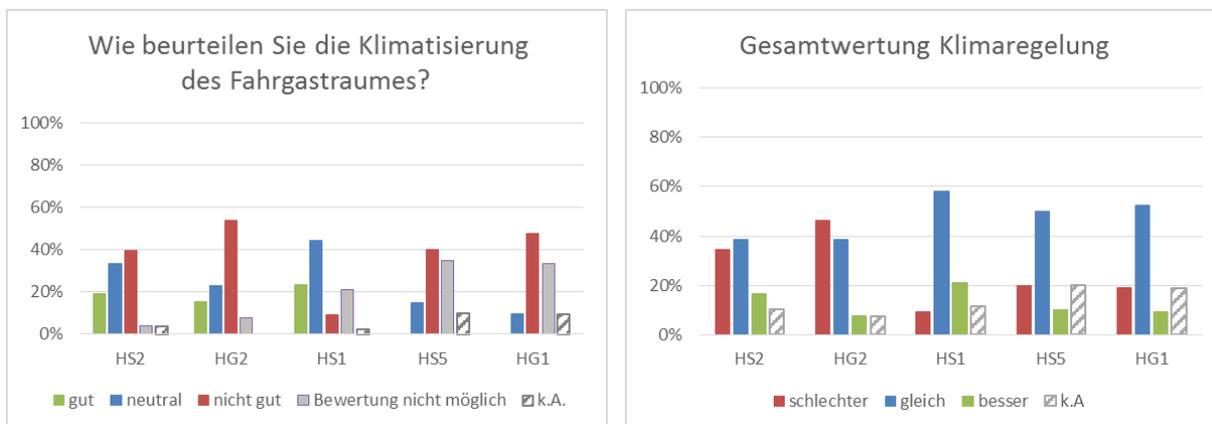
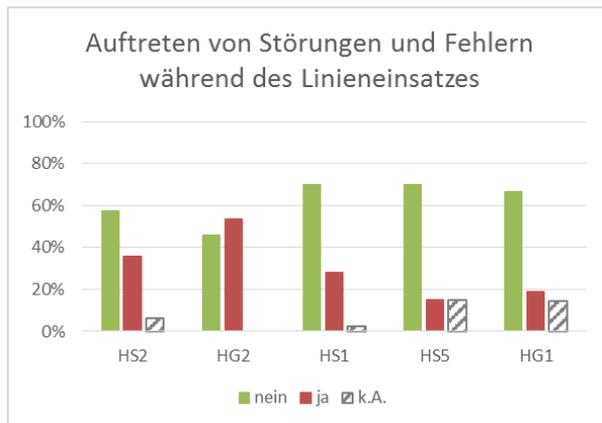


Abbildung 96: Fragen 35 und 37 – Bewertung der Klimatisierung

### Störungen und Fehler am Hybridsystem – Frage 36

Abbildung 97 zeigt, wie viele Fahrer Störungen oder Fehler während ihres Linieneinsatzes mit den Hybridbussen beobachteten, darunter auch Fehler ohne Bezug zum Hybridsystem wie Türstörung, Klimaanlage, Beleuchtung usw.



**Abbildung 97: Frage 36 – Störungen und Fehler während des Linieneinsatzes**

Tabelle 28 listet die von den Fahrern häufiger genannten Störungen, die sich auf das Hybrid-system beziehen. In der Regel wurden derartige Störungen von den einzelnen Fahrern nur wenige Male beobachtet. Für HS1 wurde das Auftreten von Störungsmeldungen mit etwas größerer Häufigkeit angezeigt. Für solche Störungsmeldungen wurde angegeben, dass sie sich durch vollständiges Abschalten der Zündung und Neustart des Fahrzeugs beheben lie-ßen. Dieser Vorgang erfordere aber zusätzliche Zeit, die zu Verspätungen führen könne, be-sonders wenn der Fehler mehrmals auftrete.

**Tabelle 28: Frage 36 – Beschreibung der Störungen und Fehler im Liniendienst**

Beschreibungen der Fahrer zu den häufiger beobachteten Störungen und Fehlern mit Bezug zum Hybridsystem
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Fahren war nur mit sehr geringer Geschwindigkeit möglich</li> <li>- Dieselmotor schaltete sich nicht zu</li> <li>- Störung Motorsystem</li> <li>- Störung Hybridsystem</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Störungsmeldung: Hybridsystem / Aufbausteuerung / Fehler in der Hochvoltanlage</li> <li>- kein rein elektrisches Fahren möglich</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Getriebestörung</li> <li>- Systemausfall „Stop“</li> </ul>

### Fahrgastrückmeldungen – Frage 38

Zu den Fahrgastreaktionen äußerten sich bei jedem Fahrzeugtyp jeweils etwa die Hälfte der Fahrer und Fahrerinnen.

Die beschriebenen Fahrgastreaktionen deckten sich im Wesentlichen mit der Bewertung durch die Fahrer. Viele Fahrgäste äußerten sich positiv zu den Fahrzeugen. Das leisere Grundgeräusch wurde häufig gelobt. Besonders begrüßt wurde das leise und abgasfreie Fahren im Bereich der Haltestellen. Kritik gab es zu den Parallelhybriden für die Geräusche und Vibrationen beim Zuschalten des Dieselmotors und beim Schalten. Die Funktionsweise der Hybridbusse, deren Energieeffizienz und ökologische Wirkung sowie auch die Kosten für solche

Fahrzeuge wurden als häufige Themen der mit den Fahrgästen geführten Gespräche angegeben. Sonstige Reaktionen betrafen in einzelnen Nennungen die Innenausstattung, die Heizung oder bestimmte Geräusche (Lüfter, Pfeifen).

### **Anregungen und Vorschläge für die Weiterentwicklung der Hybridbusse – Frage 39**

Viele Hinweise der Fahrer und Fahrerinnen widmeten sich noch einmal detailliert der Gestaltung des Fahrerplatzes (Anbringung und Bedienung der Spiegel, Verstellbarkeit Sitz-Pult-Lenkrad, Blendschutz, Beseitigung von Sichtbehinderungen z. B. stark gegliederte Seitenscheiben, Anordnung der Bedienelemente, Übersichtlichkeit, Ablagen, Heizung/Klimatisierung).

Im Hinblick auf mögliche Unfälle wies ein Kommentar darauf hin, dass das Gefährdungspotenzial der Hochspannungstechnik nicht unterschätzt werden sollte.

Zum effizienten Betrieb der Hybridbusse wurde angeregt, die Fahrer möglichst ständig mit diesen einzusetzen, um ein Gefühl für diese Fahrzeuge zu entwickeln und Hybridbusse eine andere Fahrweise erfordern als Dieselbusse.

Breiten Raum nahmen die Wünsche zur Verbesserung des Schalt- und Start-Stopp-Verhaltens der Parallelhybridbusse ein (Beseitigung der Schaltpausen und der damit verbundenen Geräusche, Vibrationen und Beschleunigungsunterbrechungen).

Mit Ausnahme von HG1 wurde für alle Hybridbusse ein besseres Beschleunigungsverhalten, insbesondere auch im rein elektrischen Fahrmodus, gefordert, damit Fahrplanvorgaben besser eingehalten werden können.

Für die Weiterentwicklung der Hybridtechnik wünschten sich die Fahrer

- über größere Distanzen und längere Zeit elektrisch fahren zu können,
- elektrische Speicher mit größerem Energieinhalt, um auch im Stand an Haltestellen Beleuchtung, Heizung usw. ohne Zuschalten des Dieselmotors betreiben zu können sowie
- eine Verbesserung der Kraftstoffeinsparungen im praktischen Linieneinsatz.

Weiterhin wurde angeregt, das Zuschalten des Motors durch den Fahrer direkt beeinflussen zu können (z. B. über die Stellung des Fahrpedals).

Einzelne Kommentare enthielten Hinweise, die Fahrermeinung bereits bei der Fahrzeugentwicklung einzubeziehen oder die Möglichkeiten für Solarenergienutzung ebenfalls ins Auge zu fassen.

Etliche Fahrer fassten ihre Erfahrungen in einer Gesamtschätzung des jeweiligen Fahrzeugs zusammen. Trotz einzelner sehr kritischer Einschätzungen für die Fahrzeuge eines Herstellers wurde dort beispielsweise auch angemerkt: „Im Allgemeinen ist das ein sehr schöner Bus, auch für die Fahrgäste!“ „Ich fahre gern damit!“, „Lenkung und Bremsen sind perfekt!“. Durchgängig positiv waren die Gesamtschätzungen für die HG1. Für die HS5 wurde erheb-

licher Entwicklungsbedarf festgestellt. Die Kommentare zu den HS1 galten der Weiterentwicklung der Hybridtechnik im Allgemeinen oder befassten sich mit den bereits oben angeführten Details.

### **Zusammenfassung**

Aus den Fragebögen ist eine positive Einstellung zu den Zielen der Hybridtechnik zu erkennen. Das zeigen insbesondere die Hinweise zur Weiterentwicklung. Hier zählen längeres rein elektrisches Fahren, durchgängig elektrischer Betrieb während der Haltestellenaufenthalte sowie eine noch effizientere Kraftstoffnutzung zu den Wünschen.

Beim Beschleunigungsverhalten meldeten die Fahrer Verbesserungsbedarf an. Kräftigeres Beschleunigen im elektrischen Modus und Wegfall der Unterbrechungen, die beim Zuschalten des Dieselmotors und beim Schalten der Parallelhybridfahrzeuge auftreten, wurden sehr häufig genannt.

Das Beschleunigen im elektrischen Betrieb wurde oftmals als gleichmäßiger, angenehmer und fahrgastfreundlicher empfunden.

Als Unterschied im Bremsverhalten wurde angegeben, dass die Hybridbusse gefühlvoller und besser dosiert gebremst werden können (Ausnahme: HS5). Die anderen Fahreigenschaften wurden ähnlich wie bei konventionellen Dieselnissen bewertet, nur der Anfahrvorgang häufig als langsamer und länger dauernd beschrieben.

Die beim Zuschalten des Dieselmotors und beim Schalten der Parallelhybridfahrzeuge auftretenden Geräusche und Vibrationen wurden heftig kritisiert. Die Grundgeräusche der Fahrzeuge wurden jedoch oft als leiser empfunden.

Die Umstellung auf das Fahren der Hybridbusse verursachte den Fahrern meist keine Probleme, obwohl Unterschiede gegenüber der Bedienung von konventionellen Dieselnissen ausgemacht wurden. Diese bestanden u.a. in der Nutzung des Gaspedals zum rekuperierenden Bremsen. Wie zu erwarten, gaben Fahrer mit einer Kurzunterweisung eher Schwierigkeiten beim Umstieg auf die Hybridbusse an.

Eine stärkere Heizung für sowohl den Fahrer als auch die Fahrgäste wurde für alle Fahrzeuge angeregt.

Die Hinweise zur Gestaltung des Fahrer Arbeitsplatzes waren zahlreich. Sie betrafen u. a. die Größe, Anzahl und Sicherheit der Ablagen, die Einstellbarkeit des Platzes, Sicht- und Erreichbarkeit der Anzeigen und Bedienelemente, Blendschutz usw. Hinsichtlich der Signalisierung von Energieeffizienz und Speicherzustand war die Bewertung herstellerabhängig. Sofern Fahrplan und Anzeige eine Ausrichtung des Fahrstils auf diese Eigenschaften zuließen, wurde dies von den Fahrern häufig umgesetzt.

## Anhang G 2 Bewertung durch die Werkstattleiter

Zusätzlich zur laufenden Erfassung der angefallenen Arbeiten an den Hybridbussen wurden die Werkstattleiter am Ende der Projektlaufzeit nach ihrem Gesamteindruck zu den Fahrzeugen und zum Herstellerservice befragt. Dabei wurde zweistufig vorgegangen. Basierend auf den Antworten zum versendeten Fragebogen erfolgte in Telefonaten eine weitere Präzisierung. Die daraus resultierende Gesamtbewertung ist im Hauptteil des Berichtes erläutert. Hier werden im Folgenden die wörtlichen Antworten aus den Fragebögen dargestellt. (Wurden zu einem Punkt keine Angaben gemacht, ist das in den Tabellen durch “-” gekennzeichnet.

Es wurden die Werkstätten der sieben beteiligten Verkehrsunternehmen angeschrieben. Alle Werkstätten beteiligten sich an der Befragung.

**Tabelle 29: Antworten zu den Fragen 1 bis 4**

Frage	FFG	Jasper	SBG	VHH	üstra	WVG	SBI
Die Werkstatt betreut Diesel-Hybridbusse seit ca. _ Jahren.	5	3	4	1	6	0,5 Jahren	1,5 Jahren
Dauer der Garantie/Gewährleistung für die Hybridbusse (ggf. unterschieden in Hybridantriebsstrang und konventionellen. Fahrzeugteil)?	3 / 4 Antrieb Jahre	2 Jahre	2 / 4 Jahre	3 Jahre	-	5 Jahre	5 Jahre

**Tabelle 30: Ausbildung des Werkstattpersonals**

5. Welche Schulungen/Unterweisungen haben Sie bzw. Ihre Mitarbeiter zur Arbeit an den Hybridbussen und/oder zu Arbeiten am Hochvoltssystem erhalten?	
VU 1	5 Tage: Ausbildung zum zertifizierten Hybridbustechniker
VU 2	HV-Schein, Klimaanlage-technik, Türsteuerung
VU 3	4 Tage: Fachkundiger für HV-eigensichere Fahrzeuge
VU 4	4 Tage: Fachkundiger für HV-eigensichere Fahrzeuge
VU 5	5 Tage: Anfangsqualifizierung von Kfz-Fachpersonal für Arbeiten an Fahrzeugen mit HV-Systemen für Arbeiten der Stufe 2b gem. BGI 8686 5 Tage: Kundendienstschulung Hybrid System 1 2 Tage: Kundendienstschulung Hybrid System 2
VU 6	Hybridbussensibilisierung am PC Lehrgänge: BK 01/a (Linienbus Kunde) und BH-01/a (HV-Fachkraft am Hybridbus)
VU 7	BH-01/a (HV-Fachkraft am Hybridbus)

Tabelle 31: Arbeiten der Werkstatt an den Hybridbussen

6. Welche Arbeiten werden in Ihrer Werkstatt von unternehmenseigenem Personal an den Hybridbussen durchgeführt?			
	Arbeiten am Hybridsystem	sonstige Wartung	sonst. Instandsetzung
VU 1	ja	ja	ja
VU 2	-	Wartungsintervalle	Kleinreparaturen
VU 3	nur Freischalten u. Inbetriebnahme	ja	ja
VU 4	-	-	Matrixanal., RBL, Kleinstreparaturen
VU 5	ja	ja	ja
VU 6	-	-	Reifenwechsel, IBIS-Anlage
VU 7	-	ja	ja

Tabelle 32: Ausfallverhalten und Reparaturdauer

7. Welchen Eindruck haben Sie vom Ausfallverhalten der Hybridbusse hinsichtlich Häufigkeit und Dauer im Vergleich zu normalen Dieselnissen?							
	Die Hybridbusse fallen aus:			Die Reparaturen dauern meist			Bemerkungen
	häufiger	gleich oft	seltener	länger	gleich lang	kürzer	
VU 1	x	-	-	-	-	-	Text s. unten
VU 2	-	x	-	x	-	-	-
VU 3	-	x	-	x	-	-	-
VU 4	x	-	-	-	x	-	-
VU 5	-	x	-	-	x	-	-
VU 6	-	x	-	x	-	-	-
VU 7	x		-	x	-	-	-

VU 1: Zur Reparaturdauer ist zu diesem Zeitpunkt keine verlässliche Aussage möglich.

Tabelle 33: Häufige Störungen und Fehler

<b>8. Welche Störungen/Fehler traten aus Ihrer Sicht an den Hybridbussen am häufigsten auf? Bitte geben Sie an, ob diese in der Regel zum Ausfall des Busses führten und ob die Beseitigung der Störung in der eigenen oder in einer Fremdwerkstatt erfolgte?</b>			
	<b>Fehler/Störung</b>	<b>Ausfall auf Linie</b>	<b>Fehlerbeseitigung durch eigene/fremde Werkstatt</b>
VU 1	Türsteuerung	ja	sowohl eigene als auch fremde
	entladene Bordbatterien (24V)	sowohl auf Linie als auch im Betriebshof	sowohl eigene als auch fremde
VU 2	Türstörung	ja	fremde Werkstatt
	Hybridstörung	ja	fremde Werkstatt
	Bremsstörung	ja	fremde Werkstatt
VU 3	Injektor Dieselmotor	ja	fremde Werkstatt
	elektrischer Kompressor	nein	fremde Werkstatt
	AdBlue-System	nein	eigene Werkst.
VU 4	Heizung	ja	fremde Werkstatt
	Lima	ja	fremde Werkstatt
	keine Leistung	ja	fremde Werkstatt
VU 5	Kupplungssteller	ja	fremde Werkstatt
	Kühlmittelpumpe	nein	fremde Werkstatt
VU 6	1 Mal Fehler im Hybridsystem	nein	fremde Werkstatt
VU 7	Hybridsystem	nein	fremde Werkstatt

Tabelle 34: Technische Voraussetzungen für Wartung u. Instandhaltung

<b>9. Wie beurteilen Sie die technischen Voraussetzungen für die Wartung und Instandhaltung bei den Diesel-Hybridbussen im Vergleich zu normalen Dieselnbussen? Geben Sie dazu ggf. Einzelheiten und Unterschiede zwischen den eingesetzten Typen an.</b>				
	<b>Zugänglichkeit und Wartungsfreundlichkeit sind beim Hybridbus</b>			<b>Bemerkungen</b>
	<b>besser</b>	<b>gleich</b>	<b>schlechter</b>	
VU 1	-	x	-	-
VU 2	-	-	x	Zugänglichkeit versch. Filter schwierig
VU 3	-	x	-	-
VU 4	-	-	x	-
VU 5	-	x	-	-
VU 6	-	x	-	-
VU 7	-	x	-	-

Tabelle 35: Arbeiten mit abweichendem Arbeitsaufwand

<b>10. Bitte geben Sie an, welche Arbeiten in Ihren Werkstätten einen höheren bzw. niedrigeren Aufwand im Vergleich zu konventionellen Dieselnissen erforderten.</b>			
	<b>geringerer Aufwand</b>	<b>geringfügiger Mehraufwand</b>	<b>erheblicher Mehraufwand</b>
VU 1	Zu diesem Zeitpunkt ist noch keine qualifizierte Bewertung möglich		
VU 2	Generatorarbeiten	Türsteuerung, da z. T. elektr. Türen verbaut sind	Wartungsarbeiten, da das Hybridsystem heruntergefahren werden muss
VU 3	-	Reparaturen, für die das Fahrzeug freigeschaltet werden muss	Wartungsarbeiten
VU 4	keine Erkenntnisse	keine Erkenntnisse	keine Erkenntnisse
VU 5	keine	keine	keine
VU 6	Keine Angabe möglich, da für die Fahrzeuge ein Full-Service-Wartungsvertrag mit dem Hersteller besteht.		
VU 7*	-	-	-

\* für die Hybridbusse der VU 7 besteht ebenfalls ein Full-Service-Vertrag mit dem Hersteller

Tabelle 36: Bewertung des Herstellersupports

<b>11. Wie beurteilen Sie hinsichtlich Wartung und Instandsetzung den Support durch den Hersteller?</b>	
VU 1	gut
VU 2	Wenn das Kundencenter erreichbar ist, dann i. O.
VU 3	mäßig, Werkstatt zeitweilig überlastet
VU 4	gut
VU 5	ausreichend bis befriedigend
VU 6	Keine Angabe möglich, da ein Full-Service-Wartungsvertrag mit dem Hersteller besteht.
VU 7*	-

\* für die Hybridbusse der VU 7 besteht ebenfalls ein Full-Service-Vertrag mit dem Hersteller

**Tabelle 37: Qualität des Herstellersupports**

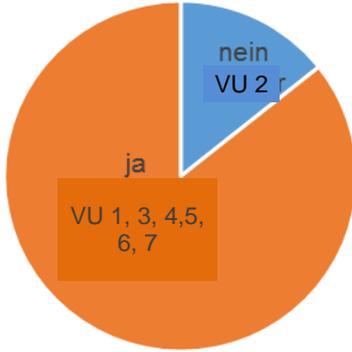
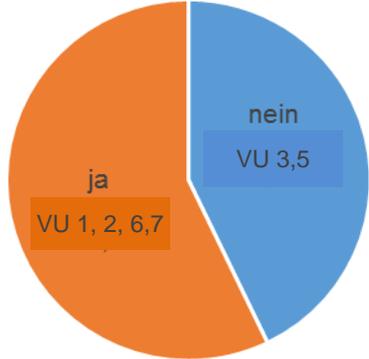
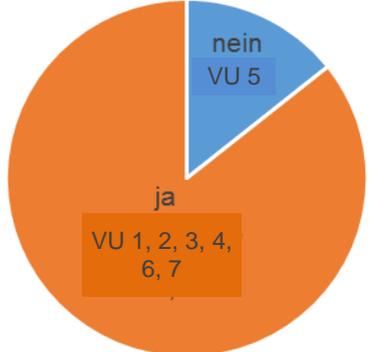
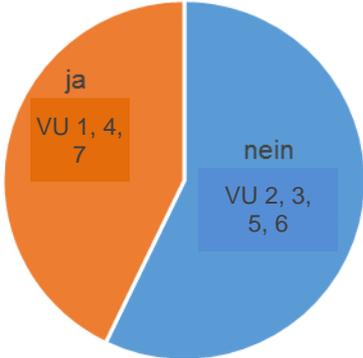
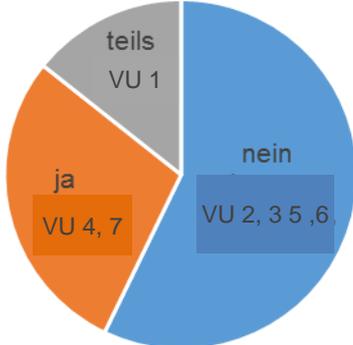
12. Waren Sie bei der Inanspruchnahme von Supportleistungen des Herstellers generell zufrieden in Bezug auf:																				
<p style="text-align: center;"><b>Erreichbarkeit des Supports</b></p>  <table border="1"> <tr> <th>Kategorie</th> <th>VU</th> </tr> <tr> <td>ja</td> <td>1, 3, 4, 5, 6, 7</td> </tr> <tr> <td>nein</td> <td>2</td> </tr> </table>	Kategorie	VU	ja	1, 3, 4, 5, 6, 7	nein	2	<p style="text-align: center;"><b>Reaktionszeit des Supports</b></p>  <table border="1"> <tr> <th>Kategorie</th> <th>VU</th> </tr> <tr> <td>ja</td> <td>1, 2, 6, 7</td> </tr> <tr> <td>nein</td> <td>3, 5</td> </tr> </table>	Kategorie	VU	ja	1, 2, 6, 7	nein	3, 5	<p style="text-align: center;"><b>Qualität der Problembearbeitung</b></p>  <table border="1"> <tr> <th>Kategorie</th> <th>VU</th> </tr> <tr> <td>ja</td> <td>1, 2, 3, 4, 6, 7</td> </tr> <tr> <td>nein</td> <td>5</td> </tr> </table>	Kategorie	VU	ja	1, 2, 3, 4, 6, 7	nein	5
Kategorie	VU																			
ja	1, 3, 4, 5, 6, 7																			
nein	2																			
Kategorie	VU																			
ja	1, 2, 6, 7																			
nein	3, 5																			
Kategorie	VU																			
ja	1, 2, 3, 4, 6, 7																			
nein	5																			
<p style="text-align: center;"><b>Zeit bis zur Problembearbeitung</b></p>  <table border="1"> <tr> <th>Kategorie</th> <th>VU</th> </tr> <tr> <td>ja</td> <td>1, 4, 7</td> </tr> <tr> <td>nein</td> <td>2, 3, 5, 6</td> </tr> </table>	Kategorie	VU	ja	1, 4, 7	nein	2, 3, 5, 6	<p style="text-align: center;"><b>Verfügbarkeit benötigter Ersatzteile u. Komponenten</b></p>  <table border="1"> <tr> <th>Kategorie</th> <th>VU</th> </tr> <tr> <td>ja</td> <td>4, 7</td> </tr> <tr> <td>teils</td> <td>1</td> </tr> <tr> <td>nein</td> <td>2, 3, 5, 6</td> </tr> </table>	Kategorie	VU	ja	4, 7	teils	1	nein	2, 3, 5, 6	<p>Anmerkung VU 1: Die Verfügbarkeit variiert.</p>				
Kategorie	VU																			
ja	1, 4, 7																			
nein	2, 3, 5, 6																			
Kategorie	VU																			
ja	4, 7																			
teils	1																			
nein	2, 3, 5, 6																			

Tabelle 38: Ersatzteilbedarf für Hybridbusse

13. Mussten für die Hybridbusse häufiger Ersatzteile angefordert werden als für vergleichbare Dieselsebuse?	
Alle Verkehrsunternehmen gaben an, dass für die Hybridbusse Ersatzteile <u>nicht</u> häufiger bestellt werden mussten als für Dieselsebuse.	
14. Bitte benennen Sie die für Hybridbusse am häufigsten benötigten Ersatzteile.	
VU 1	Blinkschalter
VU 2	Micro-Schalter für Türen/Klappen, Mikrofonhals
VU 3	Injektoren Dieselmotor, Kühlmittelpumpen
VU 4	Lichtmaschine
VU 5	Solo: Kupplungssteller Getriebe, Solo (bis zur Umrüstung s. Frage 16.1): Kühlmittelpumpe
VU 6	Keine Angabe möglich, da ein Full-Service-Wartungsvertrag mit dem Hersteller besteht.
VU 7	-
* für die Hybridbusse der VU 7 besteht ebenfalls ein Full-Service-Vertrag mit dem Hersteller	

Tabelle 39: Ersatzteilerstellung

15. Garantiert der Hersteller eine verbindliche Bereitstellungszeit für die Ersatzteile der Hybridbusse?			
	ja /nein.	Verbindliche Bereitstellungszeit	Wird dieser Zeitraum i.d.R. eingehalten?
VU 1	ja	1 Tag	ja, wird nicht immer eingehalten (s. Frage 12.)
VU 2	nein	-	-
VU 3	-	-	-
VU 4	ja	2 Tage	ja
VU 5	ja	1 – 2 Tage	nein
VU 6	nein	-	-
VU 7	ja	1 Tag	ja

**Tabelle 40: Maßnahmen zur Optimierung, Updates**

<b>16. Wurden durch den Hersteller an den Hybridbussen nach der Inbetriebnahme Maßnahmen zur Optimierung durchgeführt?</b>			
	ja /nein.	Welche Maßnahmen wurden durchgeführt?	Wie wirkten sich diese Maßnahmen aus?
VU 1	ja	1. Software Türsteuerung 2. Software HV-System	1. Türen werden beim Zündungswechsel neu parametrieret. 2. Nebenaggregate werden auch bei niedrigen Zelltemperaturen aus der HV-Batterie versorgt.
VU 2	ja	Softwareupdate Türsteuerung	Türen lernen sich nach dem Start selbständig ein. Deutlich geringere Anzahl der Fahrausfälle bzgl. Türsteuerungsproblemen.
VU 3	ja	Softwareupdate Getriebe	besseres Schaltverhalten
VU 4	ja	Änderung der Motorlagerung	Starke Vibrationen und Innengeräusche konnten auf ein erträgliches Maß reduziert werden
VU 5	ja	Solo: andere Kühlmittelpumpen für Hybridsystem und anderer Einbauort sowie geänderte Ansteuerungszeiten	Reduzierung der Ausfälle der Kühlmittelpumpen
VU 6	nein	-	-
VU 7	ja	Softwareupdate	-

**Tabelle 41: Unterschiede in den Fahrzeuggenerationen**

<b>17. Betreuen Sie Hybridbusse aus unterschiedlichen Generationen?</b>		
	ja /nein.	Wie unterscheiden sich diese hinsichtlich Störungen und Fehlern, sowie Wartung und Instandsetzung?
VU 1	nein	-
VU 2	ja	Durch die Optimierungen kaum wesentliche Unterschiede bez. der Fehler und Störungen.
VU 3	ja	Die neuen Busse sind störanfälliger.
VU 4	nein	-
VU 5	nein (in Bezug auf das Hybridsystem)	-
VU 6	nein	-
VU 7	nein	-

Tabelle 42: Unterschiede in den Fahrzeuggenerationen

<b>18. Gibt es konkrete Fehlerquellen oder Schwachstellen bei den Hybridbussen, die aus Ihrer Sicht vom Hersteller behoben werden müssten</b>		
	ja /nein.	Wie unterscheiden sich diese hinsichtlich Störungen und Fehlern, sowie Wartung und Instandsetzung?
VU 1	nein	Alle bisher bekannten Schwachstellen werden vom Hersteller bearbeitet.
VU 2	ja	Bei der Hybrid EURO 6 Generation muss die Starterbatterie überdacht werden. Es sind nur 2*105 Ah Batterien verbaut. (vgl. Citaro: 2*225 Ah)
VU 3	ja	Kühlmittelpumpen, Injektoren Dieselmotor, Kupplung
VU 4	ja	Es entsteht ein Leistungsloch beim Umschalten von E-Antrieb auf Dieselantrieb. Die dieselmotorische Leistung ist nicht ausreichend.
VU 5	ja	Bessere Abstimmung der einzelnen Systemkomponenten aufeinander durch den Hersteller Bei auftretenden Fehlern ist eine Abstimmung meistens schwierig und schwer nachzuvollziehen
VU 6	nein	-
VU 7	nein	-

Tabelle 43: Anregungen zur Weiterentwicklung der Hybridbusse

<b>19. Bitte notieren Sie hier sonstige Wünsche, Anregungen und Vorschläge zur Weiterentwicklung der Hybridbusse!?</b>	
VU 1	Zurzeit ist noch keine fundierte Aussage möglich, da die Erprobung noch andauert.
VU 2	-
VU 3	-
VU 4	-
VU 5	-
VU 6	Der Kaufpreis der Fahrzeuge muss deutlich reduziert werden. Der Kraftstoffverbrauch ist gegenüber heutzutage verfügbaren EURO-VI-Dieselnbussen zu hoch.
VU 7	-

### Anhang G 3 Fazit der Akzeptanzbefragungen

Die grundsätzliche Einstellung der Fahrer zur Hybridtechnologie ist positiv. Hinsichtlich der Fahreigenschaften, insbesondere des Anfahr- und Beschleunigungsverhaltens, wird ein mit Dieselnissen vergleichbares oder besseres Niveau erwartet. Auffällige Geräusche und Erschütterungen beim Zuschalten des Dieselmotors und beim Schalten müssen abgestellt werden. Bei konventionellen Dieselnissen bisher nicht hervortretende Geräuschquellen sind auf ihre Auffälligkeit in den ansonsten leiser empfundenen Fahrzeugen zu überprüfen. Der Gestaltung des Fahrer Arbeitsplatzes ist große Aufmerksamkeit zu widmen. Eine einheitliche und eindeutige Signalisierung von Energieeffizienz und Speicherzustand könnte vorteilhaft sein, da die Befragten, falls es möglich war, ihre Fahrweise entsprechend anpassten. Für die Zukunft werden stärkere Kraftstoffeinsparungen und längeres elektrisches Fahren erwartet.

Die Befragung der Werkstattleiter ergibt insgesamt ein eher uneinheitliches Bild. Die Bandbreite reicht von tendenzieller Ablehnung weiterer Hybridbusse bis hin zu klaren Bekenntnissen zur Hybridtechnologie, wobei die Befürworter überwiegen. Teilweise wird der Einsatz von Hybridbussen technisch zwar befürwortet, jedoch aus wirtschaftlicher Sicht in Frage gestellt.

Prinzipiell bestätigen sich die Beobachtungen zur technischen Zuverlässigkeit (vgl. Kapitel 5.2.1) durch die Aussagen der Werkstattverantwortlichen. Es wird deutlich, dass mit Ausnahme des HS5 der Schwerpunkt bei den Ausfällen nicht im Hybridantrieb im engeren Sinne (E-Traktion, Energiespeichersystem) zu finden ist. Oft sind es klassische „Buskrankheiten“, die auch bei konventionellen Fahrzeugen auftreten. Herstellerübergreifend kommen hier immer wieder Türprobleme zur Sprache.

Bei der Zufriedenheit mit dem Support fällt auf, dass bei den meisten Betreibern die Beurteilung im Fragebogen retrospektiv etwas wohlwollender ausfällt als in der laufenden SoFi-Erfassung. Prinzipiell zeigen sich die Verkehrsunternehmen mit der After-Sales-Betreuung durch die Hersteller zufrieden. Teilweise werden jedoch lange Wartezeiten auf Ersatzteile oder eine zähe administrative Abwicklung von Gewährleistungsfällen bemängelt. Über die Ursachen für die niedrigen Zufriedenheitswerte der üstra mit dem Support des Herstellers konnte die Befragung leider keine weiteren Erkenntnisse bringen.

Bei der Personalqualifikation im Werkstattbereich zeigt sich konsequenterweise ein sehr bedarfsorientiertes Vorgehen: Je höher die Wertschöpfungstiefe in der eigenen Werkstatt, desto umfassender waren die Qualifizierungsmaßnahmen. Erfreulich ist die Tatsache, dass es aus den Reihen der Werkstattmitarbeiter keine ablehnenden Äußerungen gegenüber der neuen Technologie gab, sondern diese im Einzelfall sogar als Bereicherung des Alltagsgeschäfts angesehen wurde.