Fraunhofer
IVI

FRAUNHOFER-INSTITUT FÜR VERKEHRS- UND INFRASTRUKTURSYSTEME IVI

E-Bus-Standard

»Ansätze zur Standardisierung und Zielkosten für Elektrobusse«

Gefördert durch das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit

Förderkennzeichen: 16EM3103-1

Dr.-Ing. Thoralf Knote (Autor)
Dipl.-Ing. Beate Haufe
Dr.-Ing. Lars Saroch

Dresden, Mai 2017

Inhalt

Verantwortlichkeiten für den Inhalt der einzelnen Kapitel:

Inhaltlich trägt der Autor die Verantwortung für alle Kapitel des vorliegenden Berichtes. Für Kapitel 5 wurde auf eine Zuarbeit der VCDB VerkehrsConsult Dresden-Berlin GmbH zurückgegriffen.

1 Inhalt der Studie 4

2 Fahrzeugtechnik 5
2.1 Nachladestrategien 5
2.2 Grundsätzlicher technischer Aufbau und technische Reife 7
2.3 Heizung und Klimatisierung 8
2.4 Elektroenergiespeicher 10
2.5 Normen 11
2.6 Kosten 11
2.7 Fahrzeuge 12
2.7.1 Solaris Urbino 12 electric 12
2.7.2 Citea Low Floor Electric 13
2.7.3 Sileo S12 13
2.7.4 EBUSCO 14
2.7.5 IRIZAR i2e 14
2.7.6 Bolloré Bluebus 12 m 15
2.7.7 Van Hool Exquicity 18 Electric 15
2.7.8 VDL Citea SLF 181 Electric 16
2.7.9 Solaris Urbino 18 electric 16
2.7.10 Sileo S18 17
2.8 Ladeinfrastruktur 17
2.8.1 Stecker basierte Ladesysteme 18
2.8.2 Automatisierte Ladesysteme 19
2.8.2.1 Konduktive Ladesysteme 19
2.8.2.2 Induktive Energieübertragung 20
2.8.3 Standardisierung 21
2.8.3.1 Physikalische Schnittstelle 21
2.8.3.2 Kommunikationsprotokoll Ladestation – Batteriebusse 22
2.8.3.3 Ladesteuerung 23
2.8.3.4 Standardisierungsprozess 23
2.8.4 Kosten für Ladeinfrastruktur 23
2.8.5 Fazit 24

3 Technisches Marktpotenzial von Batteriebussen 25
3.1 Volllader 25
3.1.1 Datengrundlage 25
3.1.2 Fahrleistungen 26
3.1.3 Ableitung technischer Anforderungen an Volllader 28
3.2 Batteriebusse mit Gelegenheitsladung 30
3.2.1 Datengrundlage 31
3.2.2 Ableitung technischer Anforderungen an Batteriebusse mit Gelegenheitsladung 31
3.2.3 Ergebnisse – Standardbusse 33
3.2.4 Ergebnisse – Gelenkbusse 35
3.2.5 Fazit 37

4 Zielkosten für Batteriebusse und Ladeinfrastruktur 39
4.1 Mengengerüst 39

4.2 Fahrzeugkonfiguration ... 39
4.3 Ladeinfrastruktur ... 40
4.4 Vergleichsfahrzeuge ... 41
4.5 Kosten für Betrieb ... 41
4.6 Kosten für Werkstattausrüstung ... 41
4.7 Schulungskosten ... 42
4.8 Ermittlung der Zielkosten ... 42

5 Potenzial der Kostenreduktion von Batteriebussen und Ladeinfrastruktur ... 45
5.1 Batteriebusse ... 45
5.1.1 Grundfahrzeug ... 46
5.1.2 Traktionsausrüstung, Leistungselektronik und fahrzeugseitige Ladeinfrastruktur ... 46
5.1.3 Energiespeicher ... 47
5.1.4 Nebenaggregate ... 48
5.1.5 Kostenreduktionspotenzial ... 48
5.2 Ladeinfrastruktur ... 50
5.3 Wirkung bei Nichterreichung der Kostenreduktionsziele ... 50

6 Empfehlungen für die Förderung von Batteriebussen und deren Ladeinfrastruktur ... 51
6.1 Grundsätzliche Überlegungen ... 51
6.2 Förderinstrumentarien ... 51
6.3 Begleitende Maßnahmen, ergänzende Anmerkung ... 54

7 Zusammenfassung ... 55

1 Inhalt der Studie

Die vorliegende Untersuchung betrachtet Möglichkeiten der Standardisierung von Batteriebussen, die Anforderungen des Marktes an derartige Fahrzeuge, notwendige Zielkosten und Kostenreduktionspotenziale.

In einem ersten Kapitel werden Ladestrategien sowie Kerntechnologien für den Batteriebusbetrieb, insb. Fahrzeuge, Energiespeicher und Ladetechnologien näher erläutert. Diese werden mit Beispielen unterlegt. Dabei wird im Vergleich zu den in Kapitel 3 erzielten Ergebnissen deutlich, dass zurzeit angebotene Batteriebusse nur mit Einschränkungen für einen massenhaften Einsatz geeignet sind, da das wesentliche Kriterium der Reichweite noch nicht erfüllt wird.

Basierend auf der Auswertung von mehreren tausend Umlaufplänen werden in Kapitel 3 Anforderungen bezüglich der Reichweite, des nutzbaren Energieinhalts fahrzeugseitiger Energiespeicher sowie notwendiger Ladeleistungen definiert. Dabei wird deutlich, dass unter Zugrundelegung derzeitiger betrieblicher Abläufe noch substantielle Steigerungen der nutzbaren Energieinhalte in den fahrzeugseitigen Energiespeichern vonnöten sind, um Fahrzeuge für einen Massenmarkt anbieten zu können.

Im Kapitel 3 wird auch deutlich, dass die Reichweiten und somit die breite Nutzbarkeit von Batteriebussen erheblich von der Beheizung und Klimatisierung der Fahrzeuge abhängen. Dabei wird anhand von Daten herausgearbeitet, dass eine Fokussierung auf Fahrzeuge mit rein elektrischer Heizung zu einer spürbaren Behinderung der Verbreitung von Batteriebussen führen würde und Brennstoffheizungen vorläufig als Übergangstechnologie diskriminierungsfrei behandelt werden sollten.

Zielkosten für Batteriebusse und Ladeinfrastruktur werden im Kapitel 4 ermittelt. Als Zielkosten gelten diejenigen Beschaffungskosten, die zu einem kostenneutralen Betrieb im Vergleich zu Dieselbussen unter Annahme verschiedener Preisentwicklungsszenarien führen. Dabei wird deutlich, dass ein kostenneutraler Betrieb nur möglich sein wird, wenn Energiespeicher während der Nutzungszeit von Batteriebussen von ca. 14 Jahren nicht ausgetauscht werden müssen.

Kostenreduktionspotenziale werden im Kapitel 5 betrachtet. Grundlage bildet die Aufteilung von Batteriebussen in Grundfahrzeuge, batteriebusspezifische Antriebskomponenten und Energiespeicher. Die Untersuchungen zeigen, dass die in Kapitel 4 definierten Zielkosten grundsätzlich erreichbar sind, sofern übliche Produktentwicklungs- und Vermarktungszyklen unterstellt werden. Klar wird jedoch auch, dass ein Markthochlauf kurz- bis mittelfristig noch einer sukzessiv zu verringernden Förderung bedarf, da ein kostenneutraler Betrieb bei den derzeitigen Kostenstrukturen nicht möglich sein wird. Eine dauerhafte Subventionierung des Batteriebusbetriebs ist jedoch nach Ansicht des Autors nicht zu befürchten.

Aufbauend auf den Ergebnissen der Kapitel 4 und 5 werden in Kapitel 6 Vorschläge für Förderinstrumentarien unterbreitet. Diese stellen einen Kompromiss hinsichtlich der Erreichung eines kostenneutralen Betriebs, der Setzung von Anreizen für größere und länger nutzbare Energiespeicher sowie der Vermeidung von Mitnahmeeffekten dar. Anzustreben ist ein auf fünf bis acht Jahre auszurichtendes Förderprogramm, das auch einen Energiespeichertausch finanziell unterstützt.

2 Fahrzeugtechnik

Nachfolgend werden verschiedene Ladestrategien für Batteriebusse, Antriebstechnologien und verschiedene Kernkomponenten allgemein beschrieben.

Trotz enormer Fortschritte in der Entwicklung von Batterietechnologien sind Batteriebusse derzeit und auch noch in absehbarer Zukunft hinsichtlich ihrer Reichweite eingeschränkt. Daraus folgt, dass Batteriebusse nur mit Umlaufplänen mit geringer bis mittlerer Fahrweite eingesetzt werden können bzw. die Speicher im laufenden Betrieb nachgeladen werden müssen.

In jedem Fall ist vorab anhand einer Energiebilanzrechnung zu prüfen, ob sich eine Linie bzw. ein Umlaufplan für den Betrieb von Batteriebussen eignet.

2.1 Nachladestrategien

Für den Betrieb von Batteriebussen sind drei Nachladestrategien möglich, die in den Abbildungen 2-1 bis 2-3 dargestellt sind.

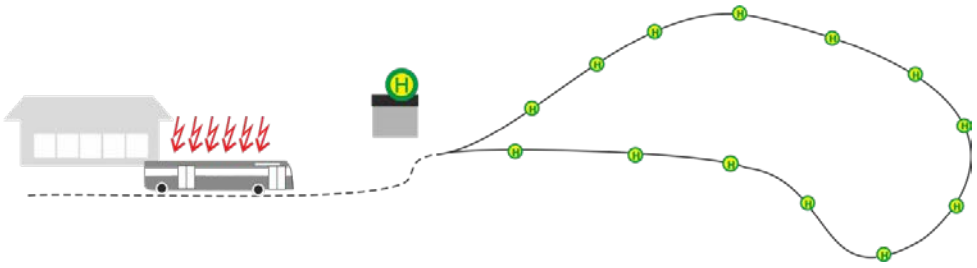

Abbildung 2-1
Nachtladen + Ganztageseinsatz ohne Zwischenladen

Nachladeregime, bei dem die elektrische Energie nur während der Betriebspausen (i. d. R. nachts) auf dem Betriebshof nachgeladen wird, werden gemeinhin als „Volllader“ oder „Depotlader“ bezeichnet. Diese Form der Nachladung hat klare Vorteile hinsichtlich der zu installierenden Ladeinfrastruktur. Diese muss lediglich auf dem Betriebshof errichtet werden, wo Ladevorgänge außerhalb des öffentlichen Straßenraums unter weitgehend kontrollierbaren Bedingungen vorgenommen werden können. Hinzu kommt, dass die Energiespeicher zumeist schonend mit vergleichsweise geringer Ladeleistung geladen werden können.

Nachteile sind die Notwendigkeit entsprechend großer und kostenintensiver Elektroenergiespeicher sowie eingeschränkte Reichweiten zwischen den Nachladevorgängen auf dem Betriebshof. Üblicherweise sind derzeit dauerhaft erzielbare Reichweiten bis 200 km ohne der Notwendigkeit einer zusätzlichen Ladeinfrastruktur auf der Strecke möglich.

Das Nachladen sowohl im Betriebshof als auch an den Endhaltestellen bzw. an Haltestellen mit längerer Wartezeit (Gelegenheitsladung) hat den Vorteil, dass bei richtiger Auslegung des Elektroenergiespeichers eine deutlich größere Reichweite ohne wesentliche Einschränkungen im Betriebsablauf erzielt werden kann. In vielen Fällen ist es sogar möglich, den Betriebsablauf, wie er mit Dieselbussen durchgeführt wird, vollständig und ohne zusätzlichen Fahrzeug- und Personalaufwand abzubilden.

Hinzu kommt, dass für diese Form des Nachladeregimes kleinere und besser in die Fahrzeuge integrierbare Elektroenergiespeicher notwendig sind.

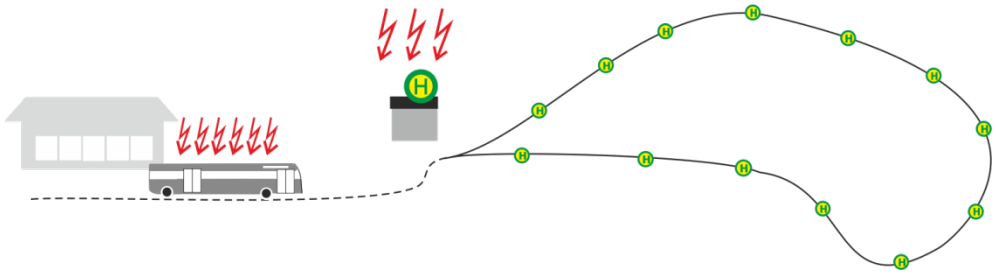

Abbildung 2-2
Nachtladen + Gelegenheitsladen in Fahrpausen an Endhaltestellen

Den unbestrittenen Vorteilen stehen jedoch auch klare Nachteile gegenüber. So ist zusätzlich eine angepasste Ladeinfrastruktur im Liniennetz zu installieren, wofür in Summe deutlich höhere Kosten anfallen als bei einer ausschließlichen Nachladung im Betriebshof. Hinzu kommen evtl. Schwierigkeiten bei der baulichen Integration der Ladeinfrastruktur in den öffentlichen Straßenraum. Darüber hinaus ist ein solches Nachladeregime nur auf Linien einsetzbar, die eine geringe bis mäßige Verspätungsanfälligkeit aufweisen.

Den Mehrkosten für die Ladeinfrastruktur an den Endhaltestellen stehen aber geringere Kosten für die Ladeinfrastruktur im Betriebshof aufgrund geringerer Ladeleistungen sowie Kosteneinsparungen durch kleinere bordseitige Elektroenergiespeicher gegenüber. Grundsätzlich ist es auch möglich, auf die Nachladung im Betriebshof zu verzichten.

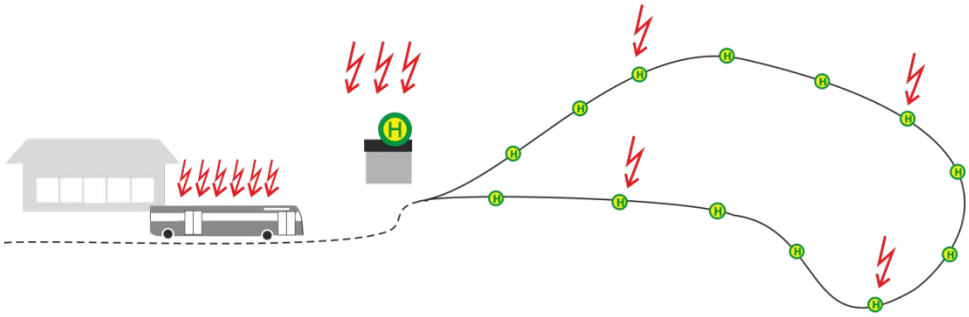

Abbildung 2-3
Nachtladen + Unterwegsladen beim Fahrgastwechsel an Haltestellen und an Endhaltestellen

Wird neben dem Nachladen auf dem Betriebshof sowie an Endhaltestellen auch Energie an Unterwegshaltestellen zugeführt, können noch kleinere Elektroenergiespeicher verwendet werden. Hinzu kommt, dass die Ladezeiten an den Endhaltestellen verringert werden können und dadurch die Verspätungsanfälligkeit eine geringere Rolle spielt.

Nachteilig sind der nochmals erhöhte Aufwand für die Ladeinfrastruktur sowie die Anforderungen an die Ladevorgänge an den Unterwegshaltestellen, die sinnvoll nur mit extrem hoher Ladeleistung durchgeführt werden können. Somit ist das Nachladekonzept nur auf Linien mit einer großen Anzahl von Fahrzeugen wirtschaftlich sinnvoll anwendbar.

Ist eine Nachladung außerhalb des Betriebshofes notwendig, ergibt sich daraus eine deutlich geringere Flexibilität im Buseinsatz, da die Busse die Halte- oder Endhaltestellen mit Ladestationen anfahren müssen. Abweichende Linienführungen, z. B. durch Umleitungen mit deutlichen längeren Fahrweiten oder die Verlängerung einer Linie über die Endhaltestellen mit Ladestation hinaus, sind

nicht ohne weiteres möglich. Gleiches gilt für Sperrungen, längerfristige Baumaßnahmen oder Ähnliches, bei denen eine Ladestation nicht angefahren werden kann.

2.2 Grundsätzlicher technischer Aufbau und technische Reife

Der Vorserienstatus spiegelt sich auch in der technischen Reife der Fahrzeuge wieder. Hierbei muss jedoch zwischen dem Grundfahrzeug, der Traktionsausrüstung, der Energieübertragung, der Fahrzeugtemperierung sowie den Elektroenergiespeichern unterschieden werden. Abbildung 2-4 zeigt den grundsätzlichen Aufbau der Traktionsausrüstung von Batteriebussen.

Alle derzeit am Markt angebotenen Batteriebusse basieren bzgl. des Grundfahrzeugs auf ausgereiften und erprobten Fahrzeugkonzepten bzw. Plattformen, die in Dieselbusausführung z. T. bereits seit Jahren angeboten werden.

Grundlage für die Traktionsausrüstung eines Batteriebusses stellt der sog. Gleichstrom-Zwischenkreis dar, über den die Anbindung aller Komponenten der Traktionsausrüstung sowie der Nebenverbraucher erfolgt. In Abbildung 2-4 wird deutlich, dass in einem Batteriebus mehrere Spannungsebnen und -formen miteinander vereint werden müssen. Dies erfolgt über den Gleichspannungszwischenkreis mit Hilfe von Umrichtern und Gleichspannungswandlern. Dabei wird die Gleichspannung auf dem Zwischenkreis in einem vorgegebenen Bereich gehalten. Eine typische Zwischenkreisspannung liegt z. B. bei 650 VDC. Ein Gleichspannungswandler zwischen Batterie und Zwischenkreis ist nicht zwingend erforderlich.

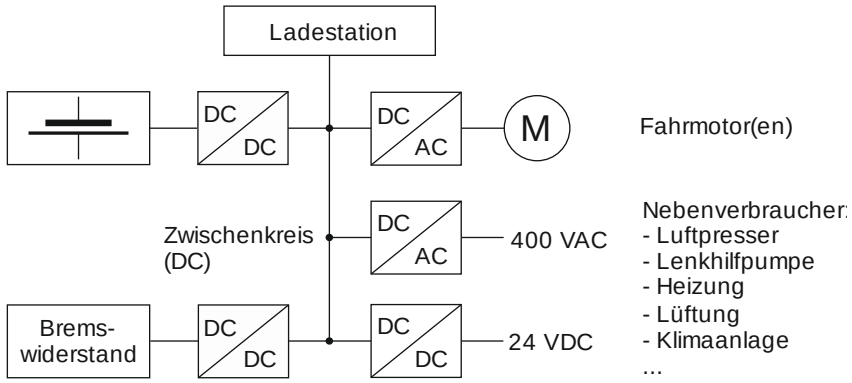

Abbildung 2-4
Grundaufbau einer Traktionsausrüstung von Batteriebussen (ohne Steuerung)

Bei der in den Fahrzeugen verbauten Leistungselektronik handelt es sich im Wesentlichen um die Umrichter, Gleichspannungswandler, den Bremswiderstand sowie die zugehörige Steuerung. Ergänzt wird die Traktionsausrüstung durch die Fahrmotoren. Je nach Definition werden auch die Elektroenergiespeicher und die Nebenverbraucher der Traktionsausrüstung zugerechnet.

Der Bremswiderstand hat eine ausschließliche Sicherheitsfunktion. Er dient lediglich dazu, den Zwischenkreis und die angeschlossenen Komponenten vor Überspannung zu schützen. Im Idealfall wird der Bremswiderstand nicht benutzt. Vielmehr wird die gesamte überschüssige Energie im Zwischenkreis, die beim regenerativen Bremsen (Rekuperation) anfällt, in den Nebenverbrauchern verbraucht oder in der Batterie gespeichert.

Bei der Traktionsausrüstung handelt es sich bei den Grundtechnologien und z. T. auch bei den konkreten Komponenten um erprobte und technisch ausgereifte Technologien und Produkte, die nicht selten bereits seit Jahrzehnten eingesetzt werden. Davon unbenommen ist die Tatsache, dass es auch bei diesen Komponenten zu Ausfällen im Rahmen ihrer Neuentwicklung und -anwendung kommen kann.

Hinsichtlich der Energieübertragung (Nachladung) ist zwischen der sog. steckerbasierten Variante und der Schnellladung zu unterscheiden. Hierzu werden im Kapitel 2.8 entsprechende Ausführungen gemacht.

Elektrisch angetriebene Nebenaggregate wie Luftpresser, Lenkhilfpumpen oder Lüfter stehen zur Verfügung, müssen aber als technisch noch nicht optimiert und ausgereift bezeichnet werden. Insbesondere die Geräuschentwicklung wird bei diesen Nebenaggregaten häufig noch kritisiert.

2.3 Heizung und Klimatisierung

Ein nach wie vor ungelöstes Problem stellt die Heizung und Klimatisierung von Batteriebussen dar. Abbildung 2-5 zeigt auf Messungen des Fraunhofer IVI basierende spezifische Heizenergiebedarfswerte für einen Standardbus.

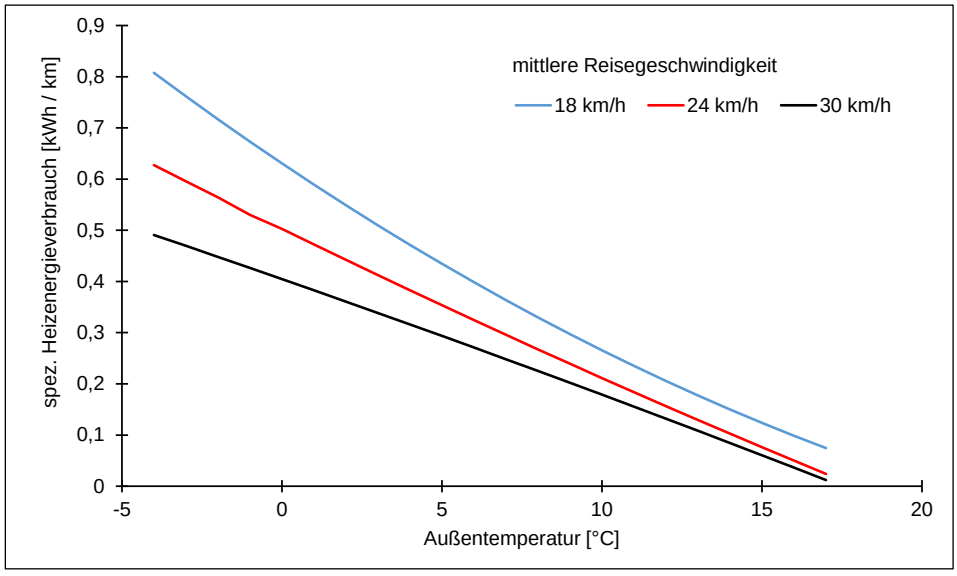

Abbildung 2-5 Heizenergiebedarf eines Standardbusses – Messwerte

Dabei handelt es sich zunächst um die in kWh / km ausgedrückte Wärmemenge. Unterstellt man bei einer rein elektrischen Widerstandsheizung einen Wirkungsgrad von annähernd 100 %, wird deutlich, dass bei sehr niedrigeren Temperaturen der Heizenergiebedarf höher sein kann als der Verbrauch für die Traktion und andere Nebenverbraucher. Dieser liegt für Standardbusse für gewöhnlich zwischen 0,9 und 1,4 kWh / km.

Die Aussagen werden durch Messwerte der Energieverbräuche der Elektroheizungen in zwei Standardbatteriebussen in Abbildung 2-6 untersetzt.

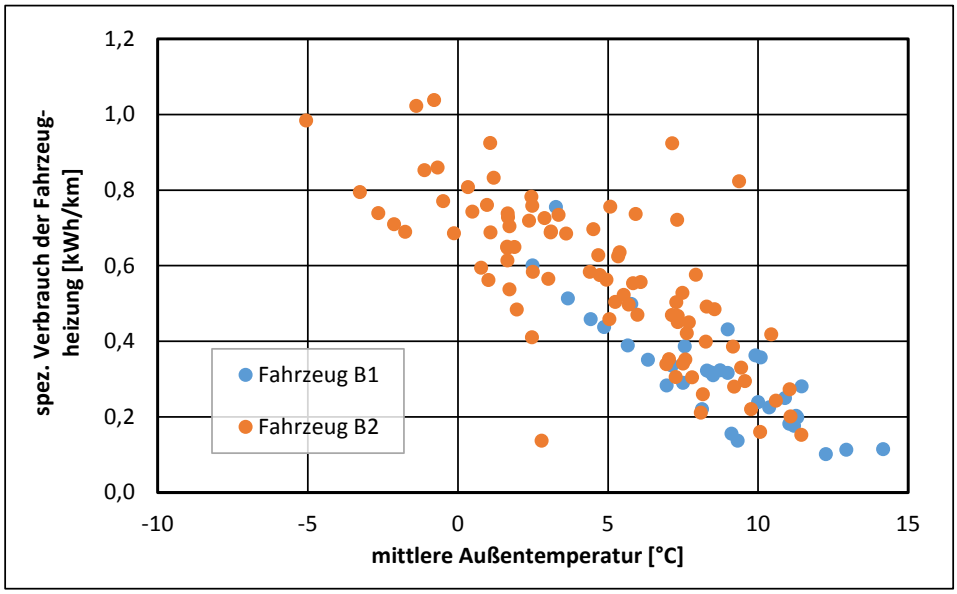

Abbildung 2-6 Energieverbrauch der Elektroheizungen in zwei Standardbatteriebussen – Messwerte aus dem realen Linienverkehr

Die Beheizung und Kühlung von Linienbussen ist in Deutschland durch die VDV-Schrift 236/1[1] geregelt. Darin wird zwischen der Beheizung des Fahrerarbeitsplatzes und des Fahrgastraumes unterschieden.

Maßgebend für den Energiebedarf ist aufgrund seiner Größe der Fahrgastraum. Dieser ist auf mindestens 18°C zu erwärmen. Bei Temperaturen von unter -10° werden mindestens 13°C gefordert.

Zurzeit existieren keine vollelektrischen Heizkonzepte, die mit einer ausreichenden Heizleistung und einer hohen Effizienz auch bei tiefen Außentemperaturen in Linienbussen eingesetzt werden können. Je nach maßgebender Außentemperatur, für die je nach Region mindestens -10°C angesetzt werden sollte, ist beim Einsatz rein elektrischer Heizungen von einer deutlichen Reduzierung der Reichweite bis hin zu deren Halbierung auszugehen.

Hinsichtlich der Kühlung des Fahrgastraums verfolgen deutsche Verkehrsunternehmen unterschiedliche Strategien. Angefangen von ungekühlten Fahrgasträumen (z. B. Dresden, Köln oder Leipzig), über die sog. 3K-ΔT-Kühlung gemäß VDV-Schrift 236/1 bis hin zur sog. Vollklimatisierung mit unterschiedlichen maximalen Innenraumtemperaturen ist ein breites Spektrum an Kühlstrategien zu finden.

Aufgrund der deutlich höheren Energieeffizienz von Klimaanlagen und den geringeren Temperaturdifferenzen wirkt sich deren Betrieb weniger stark auf die Reichweite eines Batteriebusses aus. So liegen die Reichweitenverluste bei einer 3K-ΔT-Kühlung und hohen Außentemperaturen zwischen 10 und 15 %.

Die Auswirkungen von rein elektrischen Heizungen sowie einer Vollklimatisierung auf die Einsatzfähigkeit von Batteriebussen werden im Kapitel 3 näher betrachtet.

[1] Verband Deutscher Verkehrsunternehmen: Life-Cycle-Cost optimierte Klimatisierung von Linienbussen – Teilklimatisierung Fahrgastraum – Vollklimatisierung Fahrerarbeitsplatz. Köln, 2009

2.4 Elektroenergiespeicher

Die mit den größten Unsicherheiten behafteten Komponenten sind nach wie vor die Elektroenergiespeicher. Aufgrund der in den letzten Jahren enorm gestiegenen Leistungsdichten haben sich hierbei reine Batteriekonzepte durchgesetzt. Kombinationen mit anderen Speichertechnologien, z. B. Superkondensatoren werden nicht mehr angeboten.

Bei Batterietechnologien wird zwischen sog. High-Energy- und High-Power-Batterien unterschieden. High-Power-Batterien zeichnen sich durch hohe spezifische Lade- und Entladeleistungen (W/kg) aus. Diese werden jedoch mit erheblichen Nachteilen bei der Energiedichte (Wh/kg) erkauft. High-Energy-Batterien weisen hingegen hohe Energie-, dafür aber im Vergleich geringe Leistungsdichten auf. Abbildung 2-7 zeigt Energie- und Leistungsdichten von kommerziell verfügbaren Batterien auf Zellebene. Betrachtet man die Werte auf Systemebene, also in der Form, in der Batterien in Fahrzeugen samt ihrer Peripherie verbaut werden, so liegen diese deutlich unterhalb der in Abbildung 2-7 ersichtlichen Größen.

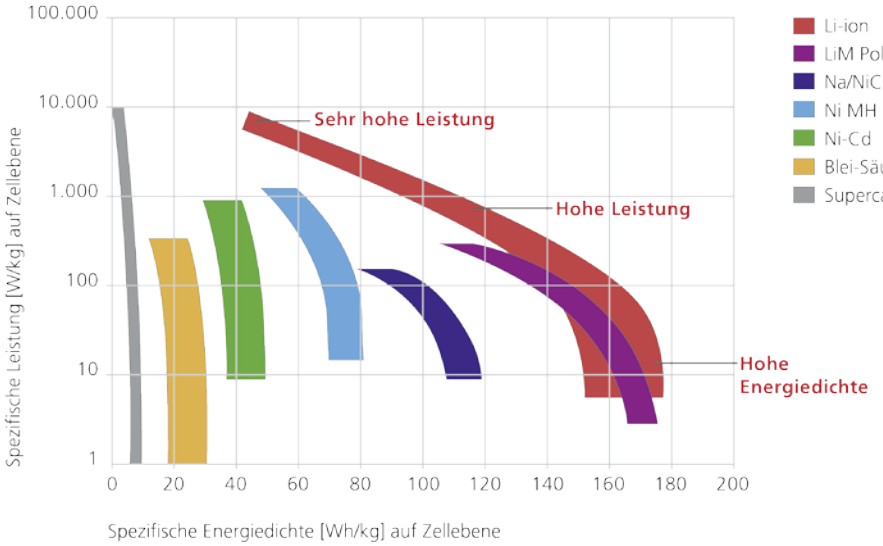

Abbildung 2-7 Energie- und leistungsdichten von Batteriespeichern – Ist-Zustand; Quelle Johnson Controls

Hinsichtlich der Weiterentwicklung von Zell- und damit Batterietechnologien muss zwischen den heutigen und den zukünftigen Zelltechnologien unterschieden werden. Lithium-Ionen-Batterien mit heutigen Zelltechnologien wird allgemein eine Steigerung der Energiedichte zwischen 10 und 20 % in den nächsten fünf Jahren unterstellt. Bei Verwendung neuer Materialien, insb. für die Kathoden, wird Lithium-Ionen-Batterien noch eine Steigerung der Energiedichte von bis zu 40 % vorhergesagt.

Gelegentlich wird in Veröffentlichungen von deutlich höheren Steigerungsraten berichtet. Hierbei handelt es sich jedoch um völlig neuartige Zelltechnologien, wie z. B. Lithium-Luft-Zellen. Deren Entwicklungsstand befindet sich jedoch noch auf Laborebene und es ist nicht davon auszugehen, dass derartige Batterien vor Mitte des nächsten Jahrzehnts kommerziell verfügbar sein werden.

Ein weiteres Thema ist die Lebensdauer von Batterien unter realen Einsatzbedingungen. Die Lebensdauer wird üblicherweise in sog. Vollzyklen angegeben. Ein Vollzyklus beschreibt je eine vollständige Entladung und Wiederaufladung.

Als Ende der Lebensdauer wird die Anzahl der Vollzyklen angegeben, bei der die Speicherfähigkeit einer Batterie auf 80 % des Neuwertes abgesunken ist.

Zwar werden Batterien auch bei sog. Volladern nicht vollständig ge- und entladen, jedoch lassen sich anhand der Vollzyklen die Einsatzzeiten von Batterien in erster Näherung abschätzen. Busse werden pro Jahr an etwa 250 Tagen auf längeren Umlaufplänen eingesetzt. Unterstellt man eine Lebensdauer der Busse von 14 Jahren, so ergeben sich daraus etwa 3.500 „Vollzyklen", was von modernen Lithium-Ionen-Batterien bereits heute theoretisch erreicht wird. Auf Praxiseinsätzen basierende Langzeiterfahrungen bzgl. der Nutzungsdauer und der Speicherfähigkeit liegen jedoch noch nicht vor.

2.5 Normen

Batteriebusse unterliegen einer Vielzahl von Normen und Sicherheitsstandards. Von Batteriebussen gehen daher nicht mehr Gefahren aus als z. B. von Dieselbussen. Besonders relevante Normen und Empfehlungen sind

- ECE R100.01 (elektrische Sicherheit – Vorgaben für die Zulassung von Elektrofahrzeugen)
- IEC 61508 – (Sicherheit)
- IEC 61851 – 1 (Konduktive Ladesysteme für Elektrofahrzeuge)
- IEC 61851 – 23 (Gleichstromladegeräte für Elektrofahrzeuge)
- IEC 61851 – 24 (Kommunikation Ladegerät – Fahrzeug, für Pkw und Lkw gedacht, wird die Norm abgewandelt voraussichtlich auch im Batteriebusbereich Anwendung finden)
- IEC 62196 – 3 (Steckverbindungen für die Ladung von Elektrofahrzeugen)
- DIN EN 50159:2010 (Sicherheitsgerichtete Ansteuerung bei beweglichen Nachladesystemen)
- ISO 26262 (Funktionale Sicherheit, derzeit für Batteriebusse nicht zwingend vorgeschrieben)
- RASt: 2006 (Einhaltung von Lichtraumprofilen in Verbindung mit Vorgaben zum konstruktiven Fahrzeugaufbau nach der StVZO)
- VDE 0115 (Sicherheit gegen direktes und indirektes Berühren, u. a. einzuhaltende Abstände)
- VDV 230/1 Rahmenempfehlung für elektrisch betriebene Stadt-Niederflur-Linienbusse (E-Bus)
- VDV 260 EBUS – Infrastruktur/Ladestellen

Ein noch nicht abschließend geklärter Punkt bzgl. der Normung ist das Zusammenspiel zwischen Fahrzeugen und Ladestationen. Hierzu finden sich Ausführungen im Kapitel 2.8.3.

2.6 Kosten

Batteriebusse befinden sich derzeit im Vorserienstatus, was sich auch in den Kosten für deren Anschaffung wiederspiegelt. (Tabelle 2-1) Mit zunehmenden Stückzahlen und abnehmenden Batteriekosten werden die Preise jedoch sinken.

Fahrzeuggröße	Kleinbus	Midibus [1)]	Standardbus	Gelenkbus
Anschaffungs-preise	ab 280.000 €	ab 400.000 €	ab 480.000 €	ab 700.000 €
[1)] 8,5 - 10,5 m				

Tabelle 2-1: Anschaffungspreise für Batteriebusse (Richtwerte)

Im Vergleich mit Dieselbussen können Batteriebusse aber länger genutzt werden. Vergleiche mit Trolleybussen, die bis zu 20 Jahre genutzt werden, sind für die Fahrzeuge selbst zulässig. Ausgenommen hiervon sind jedoch die Batterien, für die keine Erfahrungen hinsichtlich der Nutzungsdauer vorliegen und die innerhalb der Fahrzeugnutzungsdauer ein- bis zweimal getauscht werden müssen. Nach derzeitigem Stand sind dafür z. B. Kosten in Höhe von etwa 180.000 € für den Batterietausch bei Standardbussen einzurechnen. Hinzu kommen Kosten für die Erneuerung des Innenraums und die Nachrüstung neuer technischer Einrichtungen.

Maßlos überschätzt werden häufig die Kosteneinsparungen für Wartung- und Instandhaltung im Vergleich mit Dieselbussen. Dabei wird häufig übersehen, dass viele der hierfür anfallenden Kosten nicht vom Antriebsstrang abhängen. Hinzu kommt, dass noch keine Langzeiterfahrungen vorliegen.

2.7 Fahrzeuge

Batteriebusse werden von verschiedenen Herstellern angeboten. Die nachfolgende Auflistung erhebt keinen Anspruch auf Vollständigkeit. Anzumerken ist, dass sowohl MAN als auch EvoBus voraussichtlich in den Jahren 2017 und 2018 Batteriebusse vorstellen werden. Über deren Konfiguration ist jedoch nichts Offizielles bekannt.

Allen Batteriebussen ist gleich, dass sie vornehmlich für den Einsatz in Städten konzipiert wurden. Die Beförderungskapazität hängt von der Batteriegröße ab, i. d. R. werden jedoch ausreichende Fahrgastzahlen erreicht.

2.7.1 Solaris Urbino 12 electric

Hersteller:	Solaris Bus & Coach s.a., Bolechowo, Polen
Batterie:	bis zu 125 kWh (High Power) bis zu 240 kWh (High Energy)
Reichweite:	ca. 80 – 200 km, abhängig vom Fahrzyklus
Nachladung:	450 kW / 200 kW Steckerladung für Nachladung im Betriebshof
Heizung:	elektrisch, Brennstoff auf Anfrage
Kosten:	ca. 550.000 – 650.000 €

Abbildung 2-8
Solaris Urbino 12 electric an der Endhaltestelle der Linie 79 in Dresden

2.7.2 Citea Low Floor Electric

Hersteller:	VDL Bus & Coach bv
Batterie:	62 kWh / 122 kWh / 180 kWh
Reichweite:	ca. 40 – 130 km, abhängig vom Fahrzyklus
Nachladung:	330 kW / 180 kW / 300 kW Steckerladung für Nachladung im Betriebshof
Heizung:	elektrisch, Brennstoff auf Anfrage
Kosten:	ca. 550.000 – 600.000 €

Abbildung 2-9
CITEA Electric der Firma VDL; Quelle: VDL

2.7.3 Sileo S12

Hersteller:	Sileo GmbH, Salzgitter, Rohbau in der Türkei
Batterie:	230 kWh, Lithium-Eisenphosphat
Reichweite:	über 200 km, abhängig vom Fahrzyklus
Nachladung:	5 kW - 100 kW Steckerladung für Nachladung im Betriebshof
Heizung:	Diesel
Kosten:	ca. 500.000 €

Abbildung 2-10
Sileo S12

2.7.4 EBUSCO

Hersteller:	EBUSCO GmbH, Helmond, Niederlande, Zulieferung aus China
Batterie:	311 kWh
Reichweite:	über 200 km, abhängig vom Fahrzyklus
Nachladung:	nur Steckerladung für Nachladung im Betriebshof
Heizung:	Diesel
Kosten:	ca. 500.000 €

Abbildung 2-11
EBUSCO 12 m

2.7.5 IRIZAR i2e

Hersteller:	IRIZAR S. Coop., Ormaiztegi, Spanien
Batterie:	376 kWh
Reichweite:	über 200 km, abhängig vom Fahrzyklus
Nachladung:	nur Steckerladung für Nachladung im Betriebshof
Heizung:	elektrisch, Diesel
Kosten:	ca. 550.000 €

Wird zurzeit nicht auf dem deutschen Markt angeboten.

Abbildung 2-12
IRIZAR i2e auf der Linie 13 in San Sebastian

2.7.6 Bolloré Bluebus 12 m

Hersteller:	Bolloré, Frankreich
Batterie:	240 kWh nutzbar, Lithium-Metall-Polymer
Reichweite:	über 200 km, abhängig vom Fahrzyklus
Nachladung:	nur Steckerladung (65 kW) für Nachladung im Betriebshof
Heizung:	elektrisch, Diesel
Kosten:	unbekannt

Abbildung 2-13
Bollaré Bluebus 12 m; Quelle: Omnibusspiegel

2.7.7 Van Hool Exquicity 18 Electric

Hersteller:	Van Hool, Lier, Belgien
Batterie:	215 kWh, davon 186 kWh nutzbar
Reichweite:	ca. 100 km, abhängig vom Fahrzyklus
Nachladung:	250 kW 80 kW Steckerladung für Nachladung im Betriebshof
Heizung:	elektrisch
Kosten:	unbekannt

Abbildung 2-14
Van Hool Exquisity 18 Electric;
Quelle: Omnibusspiegel

2.7.8 VDL Citea SLF 181 Electric

Hersteller:	VDL Bus & Coach bv
Batterie:	u. a. 180 kWh / 240 kWh
Reichweite:	ca. 50 km, abhängig vom Fahrzyklus
Nachladung:	u. a. 270 kW / 300 kW Steckerladung für Nachladung im Betriebshof
Heizung:	elektrisch
Kosten:	ca. 750.000 €

Abbildung 2-15
VDL Citea SLF 181 Electric;
Quelle: VDL

2.7.9 Solaris Urbino 18 electric

Hersteller:	Solaris Bus & Coach s.a., Bolechowo, Polen
Batterie:	125 kWh / 175 kWh Lithium-Titanat
Reichweite:	ca. 60 km, abhängig vom Fahrzyklus und Heizung
Nachladung:	400 kW / > 300 kW Steckerladung für Nachladung im Betriebshof
Heizung:	elektrisch, Brennstoff auf Anfrage
Kosten:	ca. 850.000 – 900.000 €

Abbildung 2-16
Solaris Urbino 18 electric;
Quelle: Solaris

2.7.10 Sileo S18

Hersteller:	Sileo GmbH, Salzgitter, Rohbau in der Türkei
Batterie:	300 kWh, Lithium-Eisenphosphat
Reichweite:	bis zu 250 km, abhängig vom Fahrzyklus
Nachladung:	5 kW - 100 kW Steckerladung für Nachladung im Betriebshof
Heizung:	Diesel
Kosten:	ca. 650.000 €

Abbildung 2-17
Sileo S18

2.8 Ladeinfrastruktur

Die Ladeinfrastruktur für Batteriebusse ist untrennbar mit der Ladestrategie verbunden. Ausführungen zu Ladestrategien finden sich im Kapitel 2.1. Die Ladestrategie bestimmt dabei die zur Verfügung stehende Ladezeit und die notwendige Ladeleistung. Dabei wird zwischen der sog. Langsamladung und Schnellladung unterschieden. Diese wiederum grenzen die Ladeformen ab, die

sich in die sog. Steckerladung sowie die Ladung mit automatisierten Systemen unterscheiden.

2.8.1 Stecker basierte Ladesysteme

Die sog. Steckerladung ist zumeist nur für niedrigere Ladeleistungen geeignet. I. d. R. kommt die Steckerladung nur auf Betriebshöfen zum Einsatz, jedoch sind auch Anwendungsfälle bekannt, bei denen kleinere Busse an einer Endhaltestelle mit Steckerladung nachgeladen werden.

Combo 2 CCS-Stecker
Gleichstromladung

EN 62196 Typ 2, auch IEC Typ 2
Gleich- und Wechselstromladung

Abbildung 2-18
Für die Nachladung von Batteriebussen geeignete Steckertypen, Quelle: Internet

Abbildung 2-19
Adaptierter Stecker für Sileo-Busse, Quelle SWB-Verkehr

a) Heliox

b) BYD

Abbildung 2-20
Beispiele für Ladesäulen

Bei der Steckerladung ist weiterhin hinsichtlich der Platzierung der eigentlichen Ladetechnik zu unterscheiden. Dieses kann im Fahrzeug untergebracht sein, wodurch der Anschluss an einen reinen Wechselstromanschluss möglich ist. Dem steht die Unterbringung der Ladetechnik in externen Ladegeräten bzw. -säulen gegenüber. Diese werden i. d. R. an 400 VAC Drehstrom angeschlossen.

Abbildung 2-21
Beispiel für ein mobiles Ladegerät (Sileo-Busse), Quelle: SWB-Verkehr

Die Nachladung mit Steckern ist grundsätzlich nicht manipulationssicher und kann bei fehlender Verriegelung durch Dritte unbefugt unterbrochen werden, indem der Stecker aus der Ladebuchse des Busses gezogen wird. Dabei wird jedoch die Spannung unterbrochen, sodass keine Gefährdung besteht.

Ladegeräte werden derzeit zugeschnitten auf die jeweiligen Batteriebusse vom Hersteller mitgeliefert. Eine Standardisierung, die es erlaubt, Busse verschiedener Hersteller mit einem Ladegerät oder einer Ladesäule zu laden, existiert derzeit noch nicht.

2.8.2 Automatisierte Ladesysteme

Automatisierte Ladesysteme zeichnen sich dadurch aus, dass die Kontaktherstellung bei konduktiven Ladesystemen automatisiert erfolgt bzw. bei der induktiven Energieübertragung nicht notwendig ist. Sie kommen in erster Linie für die Nachladung an Endhaltestellen oder an Unterwegshaltestellen zur Anwendung. (Gelegenheitsladung, Opportunity Charging) Hierbei werden Ladeleistungen von 150 bis zu 650 kW eingesetzt, um in möglichst kurzer Zeit eine hohe Energiemenge übertragen zu können.

2.8.2.1 Konduktive Ladesysteme

Bei konduktiven Ladesystemen erfolgt die Kontaktherstellung über einen Kontaktkopf, der auf einem Pantographen oder einer sog. Schwinge montiert ist. Dabei kann der Pantograph oder die Schwinge auf dem Fahrzeugdach oder an einem Lademast angebracht sein. Beide Konzepte haben sowohl Vor- als auch Nachteile und es ist offen, ob sich eine Variante durchsetzen wird oder beide Konzepte am Markt bestehen bleiben werden. Eher unwahrscheinlich ist, dass sich weitere Kontaktsysteme am Markt halten werden.

Mittels konduktiver Energieübertagung können bereits heute in Abhängigkeit der Eigenschaften der Energiespeicher Ladeleistungen von bis zu 750 kW übertragen werden.

Abbildung 2-22
Beispiel für eine konduktive Energieübertragung an einer Endhaltestellen (DVB-Linie 79)

Abbildung 2-23
Ladestation für eine konduktive Energieübertragung an Endhaltestellen, aufgenommen an der Endhaltestelle der Linie 109 in Hamburg; Hersteller / Quelle: Siemens AG

2.8.2.2 Induktive Energieübertragung

Als induktive Energieübertragung wird das kontaktlose Laden, also das Laden ohne direkte physische Verbindung zum Stromnetz, unter Nutzung elektromagnetischer Felder bezeichnet. Diese werden durch die Primärspule auf der Straßenseite erzeugt und in der Sekundärspule im Fahrzeug in elektrischen Strom gewandelt. Dabei erfolgt eine Leistungsübertragung von bis zu 200 kW, höhere Leistungen sind geplant. Die tatsächliche Leistung sowie der Wirkungsgrad sind abhängig von der Position des Fahrzeugs zur Primärspule und dem Luftspalt zwischen der Sekundär- und Primärspule.

Abbildung 2-24

Sekundärspule im Fahrzeugboden, Quelle: VCDB GmbH

Vorteil der induktiven Energieübertragung ist die weitgehend im Fahrbahnboden versenkte Infrastruktur. Dem stehen jedoch im Vergleich zu konduktiven Systemen deutlich höhere Kosten sowohl für die Technik als auch die bauliche Integration gegenüber.

Induktive Energieübertragungssysteme werden derzeit von den Firmen Bombardier und Conductix Wampfler angeboten.

2.8.3 Standardisierung

Für die Nachladung von Batteriebussen existiert derzeit noch keine Normung bzgl. der physikalischen Schnittstelle sowie des Kommunikationsprotokolls.

Vor diesem Hintergrund werden im Augenblick Batteriebusse durch Verkehrsbetriebe nur in Kombination mit der zugehörigen Ladetechnik beschafft. Dies gilt sowohl für Ladegeräte bzw. -stationen im Betriebshof als auch für Ladestationen für die Gelegenheitsladung. Hintergrund ist der Wunsch der Verkehrsbetriebe, die Technologie aus einer Hand zu beziehen, um so sicherzustellen, dass ein reibungsloses Zusammenspiel zwischen Batteriebussen und Ladeinfrastruktur gegeben ist.

So verständlich diese Vorgehensweise zum gegenwärtigen Zeitpunkt ist, so wenig ist ihre Generalisierung für die Zukunft zulässig. Betrachtet man das Zusammenspiel von Batteriebussen und Ladestationen, werden schnell die Schnittstellen und die Notwendigkeiten zu deren Standardisierung deutlich:

- physikalische Schnittstelle zwischen Fahrzeug und Ladeinfrastruktur
- Kommunikationsprotokoll Ladestation – Batteriebusse
- Ladesteuerung
- Spannungsniveau und Ladeleistung.

Daraus ergeben sich auch sofort die Grenzen und notwendigen Voraussetzungen für eine getrennte Beschaffung und Installation der Ladeinfrastruktur. Diese werden nachfolgend beschrieben, wobei sich die Ausführungen rein auf die Ladeinfrastruktur außerhalb von Betriebshöfen konzentrieren.

2.8.3.1 Physikalische Schnittstelle

Wie bereits erwähnt, werden induktive Ladeverfahren für Busse derzeit von den Firmen Bombardier und Conductix Wampfler angeboten. Dabei werden grundsätzlich die Ausrüstungen für die Fahrzeug- und Infrastrukturseite gemeinsam geliefert. Es ist nicht bekannt, ob die Nutzung der straßenseitigen Infrastruktur durch fahrzeugseitige Systeme anderer Hersteller geplant ist. Nach heutigem Stand des Wissens ist dies nicht gegeben, jedoch besteht auch für die induktive Nachladung ein Normungsauftrag durch die Europäische Kommission.

Konduktive Ladeverfahren setzen ebenfalls kompatible Systeme auf der Fahrzeug- und der Infrastrukturseite voraus. Hierbei müssen

- die Kontaktform (Position des Pantographen, Anordnung der Kontakte),
- die Kontaktreihenfolge,
- die Kommunikationsform und -protokoll sowie
- die Positionierung des Kontaktsystems auf dem Fahrzeug

übereinstimmen.

Kontaktsysteme mit einem auf dem Dach des Batteriebusses angebrachten Pantographen werden von verschiedenen Herstellern angeboten. Obwohl es hier noch keine Entscheidung gibt bzgl. der Frage, welcher Anbieter bzw. welches System sich durchsetzen wird, zeichnet sich ab, dass sich das Smart Charging System® der Fa. Schunk als Quasi-Standard durchsetzen, zumindest jedoch eine hohe Marktdurchdringung erreichen wird.

Systeme, bei denen der Pantograph auf der Infrastrukturseite an einem Mast o. ä. angebracht ist, werden von Siemens/Stemman und ebenfalls von der Fa. Schunk angeboten.

Beide Systemansätze können mit der gleichen Ladestation kombiniert werden, wobei aufgrund unterschiedlicher Sicherheitsanforderungen lediglich Anpassungen bei der Kommunikationstechnik und ggf. bei der Positionserkennung erfolgen müssen.

Die Einhaltung der Kontaktierungsreihenfolge „Erdung - Plus + Minus - Control Pilot" ergibt sich aus der physischen Form des Kontaktsystems. Daraus folgt die Notwendigkeit, Systeme des gleichen Anbieters auf der Fahrzeug- und der Infrastrukturseite zu verwenden, jedoch sind Umbauten und Anpassungen z. B. auf der Infrastrukturseite im Nachgang deutlich einfacher als bei einer induktiven Ladung. Zusätzlich zu beachten ist, dass z. B. das System der Fa. Ekoenergetyka-Polska einen fünften Kontakt für die Kommunikation erfordert.

Bei der Art der Kommunikation konkurrieren derzeit Varianten mit ausschließlicher Funkübertragung und leitungsbasierter Kommunikation miteinander. Eine Anpassung der Kommunikation ist jedoch möglich, sofern die Ladestation von vornherein dafür vorbereitet wurde. Es ist davon auszugehen, dass sich die rein kontaktbasierte Kommunikation durchsetzen wird, auch wenn damit Nachteile bzgl. der Kontaktaufnahme bei der Annäherung der Fahrzeuge an die Ladestation ergeben.

Die Positionierung des Kontaktsystems auf dem Fahrzeugdach wird derzeit in einem Normungsverfahren festgelegt. Aller Voraussicht nach werden sich die Hersteller von Batteriebussen und Ladeinfrastruktur abschließend auf eine Position einigen, bei der die Kontaktierung mittig zwischen den Vorderachsen erfolgt. Dabei ist es unerheblich, ob der Pantograph auf dem Fahrzeugdach oder an einem Mast montiert wird.

2.8.3.2 Kommunikationsprotokoll Ladestation – Batteriebusse

Kommunikationsprotokolle sind notwendig, um Informationen zwischen einer Ladestation und einem Bus in einer vereinheitlichen Form austauschen zu können. Unter anderem werden Informationen zum Zwecke der Identifizierung des Busses, zur Ladeleistung, für den Ladebeginn und das Ladeende oder für den Abbruch der Ladung ausgetauscht.

Beim derzeitigen Arbeitsstand des Standardisierungsprozesses von Ladetechnologie mit automatisiertem Kontaktsystem für die Gelegenheitsladung zeichnet sich die Übernahme des Kommunikationsprotokolls nach ISO/IEC 15118 ab. Bei diesem Protokoll handelt es sich um ein Protokoll, das aus dem Pkw-Bereich stammt. Hierbei sollen jedoch Teile des Kommunikationsprotokolls, die für den sicheren ÖPNV-Betrieb nicht zwingend notwendig sind, als Option geführt werden.

2.8.3.3 Ladesteuerung

Die Ladesteuerung beschreibt die Art und Weise der Bereitstellung einer geeigneten Ladespannung und eines geeigneten Ladestroms.

Unter der Ladesteuerung werden im vorliegenden Dokument zwei Aspekte zusammengefasst. Zunächst ist die Frage zu beantworten, ob die sog. Ladeintelligenz sowie die aktive Steuerung der Ladeleistung im Fahrzeug bzw. in der Ladeinfrastruktur angeordnet sind. Sind diese im Fahrzeug untergebracht, reicht auf der Infrastrukturseite vereinfacht ausgedrückt eine einfache Spannungsquelle aus, die lediglich ausreichend Leistung zur Verfügung stellen muss. Hierbei ist es von Vorteil, dass das Risiko des Ausfalls der Ladeinfrastruktur verringert wird und diese preiswerter ist. Nachteile sind höhere Fahrzeugkosten und -gewichte, sodass zunehmend der umgekehrte Fall zur Anwendung kommt. Dabei liegt die aktive Steuerung der Ladeleistung auf der Infrastrukturseite. Diese kommuniziert mit dem Batteriemanagementsystem und erfüllt dessen Anforderungen hinsichtlich Ladestrom und -spannung.

Der zweite Aspekt betrifft die Steuerung als solches. Hierbei setzt sich zunehmend die aktive Steuerung des Ladestroms durch die Ladestation durch, bei dem die Spannung an das Niveau des Fahrzeugzwischenkreises bzw. der Batterie laufend angepasst wird. Bei der sog. Stromstärkeregelung erhält die Ladestation laufend Vorgaben bzgl. des Ladestroms, wobei das Batteriemanagementsystem diesen überwacht und im Fehlerfall den Ladevorgang abbricht.

Da zum gegenwärtigen Zeitpunkt nicht absehbar ist, ob es bzgl. der Ladesteuerung zu einer Standardisierung kommen wird, muss eine fahrzeugunabhängig installierte Ladestation in der Lage sein, sowohl als passive Spannungsquelle zu agieren als auch den Ladestrom aktiv zu steuern.

2.8.3.4 Standardisierungsprozess

Mit dem Normungsmandat M/533 vom 12.03.2015 hat die Europäische Kommission den für die Normung zuständigen Institutionen einen klaren Normungsauftrag für die Nachladung von Batteriebussen erteilt. Obwohl darin nicht ausdrücklich auf Schnellladekontaktsysteme Bezug genommen wird, ist davon auszugehen, dass der Normungsauftrag zu einer Standardisierung der physikalischen Schnittstelle sowie des Kommunikationsprotokolls führen wird. Angestrebter Termin für die Veröffentlichung der zu erarbeitenden Norm ist der 31.12.2019.

Unabhängig von dem erwähnten Normungsauftrag arbeiten Industrie, Verkehrsbetriebe sowie die UITP und der VDV an einer Normung.

2.8.4 Kosten für Ladeinfrastruktur

Ladesäulen und Ladegeräte werden je nach Ladeleistung und Ausführung für 15.000 bis 75.000 € angeboten. Aufgrund ihrer geringen Anschlussleistung ist ein direkter Anschluss an das Niederspannungsnetz i. d. R. problemlos möglich. Bei Ladesäulen sind jedoch die Installationskosten für die Verkabelung mit zu beachten.

Ladestationen mit einer Ladeleistung von 200 kW und mehr sind für etwa 750 – 1.000 € pro Kilowatt Ladeleistung erhältlich. Für die Installation eines Lademastes müssen je nach Ausführung zwischen 5.000 und 45.000 € eingerechnet werden.

Schwer vorab kalkulierbar sind die Kosten für den Anschluss von Ladestationen. Aufgrund der hohen Ladeleistungen ist zumeist der Anschluss an das Mittelspannungsnetz notwendig. Je nach Entfernung zu einem ausreichend leistungsfähigen Anschluss können die Kosten mehrere 10.000 Euro betragen. Hinzu kommen noch die Kosten für den Mittelspannungs-Niederspannungs-Transformator von ebenfalls mehreren 10.000 Euro.

2.8.5 Fazit

Die für die Nachladung von Batteriebussen notwendige Ladeinfrastruktur wird von verschiedenen Herstellern angeboten und ist durchgängig beim Kauf von Batteriebussen mit beziehbar. Zurzeit existiert noch keine Standardisierung für die physischen Kontakte sowie die Kommunikation zwischen Ladeinfrastruktur und Fahrzeugen. Es ist jedoch davon auszugehen, dass eine solche Standardisierung in den nächsten Jahren existieren wird, wodurch es z. B. möglich sein wird, Batteriebusse unterschiedlicher Hersteller an einer Ladestation laden zu können. In der Zwischenzeit ist die gemeinsame Beschaffung von Fahrzeugen und Ladeinfrastruktur dringend zu empfehlen.

3 Technisches Marktpotenzial von Batteriebussen

3.1 Volllader

Maßgebend für die Alltagstauglichkeit von Batteriebussen wird deren Reichweite mit oder ohne Nachladung sein. Davon hängt ab, wie viele der sog. Umlaufpläne mit Batteriebussen abgedeckt werden können, woraus sich unmittelbar deren technisches Marktpotenzial ableitet.

Umlaufpläne beschreiben alle Fahraufgaben eines Busses nach Verlassen des Betriebshofes bis zu dessen Rückkehr. Darin eingeschlossen sind

- die Aus- und Einrückefahrten (auch als Ein- und Aussetzfahrten bezeichnet),
- Linienfahrten,
- Leer- oder Umsetzfahrten sowie
- Wende- und Standzeiten.

Häufig werden die Begriffe „Umläufe" oder „Dienste" synonym verwendet.

Aufgrund der Tatsache, dass die Kosten für das Fahrpersonal zwischen 55 und 65 % der Gesamtkosten im Linienbusbetrieb ausmachen, sind Umlaufpläne i. d. R. hinsichtlich eines minimalen Personaleinsatzes optimiert. Batteriebusse werden daher nur einen Markt haben, wenn deren Einsatz keine oder nur geringfügige Änderungen am Gros der Umlaufpläne nach sich ziehen.

Zur Abschätzung des Marktpotenzials bzw. zur Bestimmung von Mindestreichweiten zur Erschließung eines bestimmten Marktanteils wurden daher reale Umlaufpläne aus verschiedenen Verkehrsunternehmen der Schweiz und Deutschland analysiert.

3.1.1 Datengrundlage

Um eine Übersicht über notwendige Reichweiten zu erhalten, wurden in einem ersten Schritt 2.563 Umlaufpläne (Schultage) und 2.940 (Wochenende und Feiertage) aus insgesamt 16 Verkehrsunternehmen analysiert.

Die Datengrundlage enthält Informationen von Verkehrsbetrieben aus Klein-, Mittel- und Großstädten, wobei die Daten aus Großstädten überwiegen. Um die dadurch hervorgerufene Ergebnisverzerrung zu minimieren, wurden die Umlaufpläne anhand der Einwohnerzahlen ihres Bedienungsgebietes klassifiziert. Anschließend wurden die Daten anhand der deutschlandweiten Anteile von Klein-, Mittel- und Großstädten und der Anzahl der Busse pro Einwohner gewichtet.

Eine Ergebnisverzerrung kann jedoch nicht ausgeschlossen werden, da

- die genaue Einwohnerzahl des jeweiligen Bedienungsgebietes nicht immer ermittelt werden konnte,
- für manche Städte nicht die Daten aller dort agierenden Verkehrsunternehmen zur Verfügung standen,
- der Umfang des Busverkehrs in Großstädten stark vom Vorhandensein anderer ÖPNV-Systeme (z. B. Straßenbahnen) abhängig ist, sowie
- die Datengrundlage hierfür nicht ausreichend groß ist.

3.1.2 Fahrleistungen

Einen ersten Überblick über die Einteilung der analysierten Umlaufpläne nach ihren Fahrleistungen (Fahrleistungsklassen) zeigt Abbildung 3-1. Die Betrachtung fokussiert sich hierbei zunächst auf Schultage, da diese mit weitem Abstand die meisten Verkehrstage stellen. Zunächst ist zu erkennen, dass etwa 63 % der Umlaufpläne von Standardbussen eine Fahrleistung von unter 150 km aufweisen, was bereits heute durch Batteriebusse ohne Nachladung abgedeckt werden kann. Unterstellt man dauerhafte eine Reichweite von 200 km, könnten sogar rund 70 % aller Umlaufpläne ohne Nachladung bedient werden.

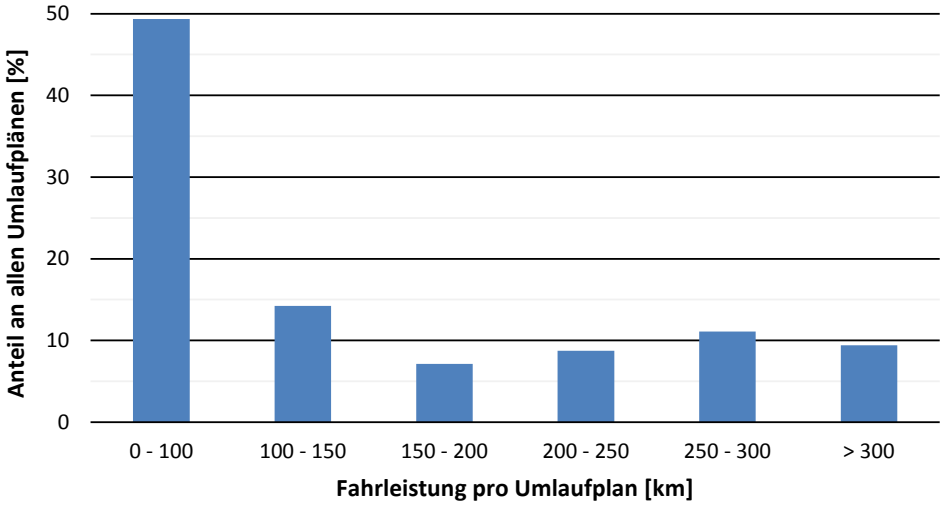

Abbildung 3-1
Einteilung der Umlaufpläne an Schultagen in einzelne Fahrleistungsklassen, Standardbusse

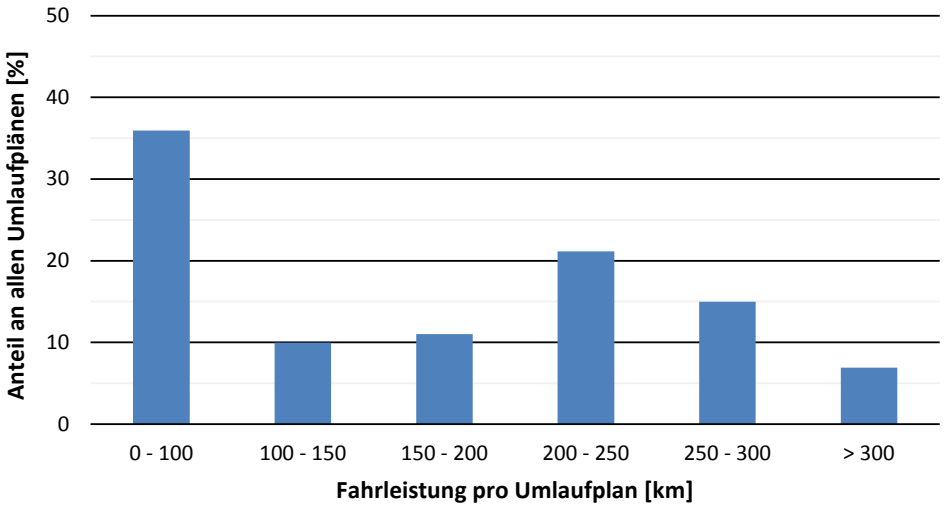

Abbildung 3-2
Einteilung der Umlaufpläne an Schultagen in einzelne Fahrleistungsklassen, Gelenkbusse

Die Umlaufpläne für Gelenkbusse zeigen ein ähnliches Bild. (Abbildung 3-2) Auch für diese Fahrzeuge weisen knapp 60 % der Umlaufpläne eine Fahrleistung von unter 200 km auf.

Aus diesen Daten darf aber keinesfalls ein direkter Rückschluss auf das technische Marktpotenzial von Batteriebussen gezogen werden, da

1. kurze Umlaufpläne zumeist nur Verstärkerfahrten in den Verkehrsspitzenzeiten abdecken,
2. hierfür häufig ältere Fahrzeuge zum Einsatz kommen, i. d. R. jedoch keine Neuanschaffungen getätigt werden,

3. mehrere kurze Umlaufpläne an ein und demselben Tag durch ein Fahrzeug bedient werden,
4. der Einsatz von Batteriebussen auf kurzen Umlaufplänen unwirtschaftlich ist und
5. die Umweltentlastung nur gering wäre, wodurch ein wichtiges Argument pro Batteriebusse verlorenginge.

Für die Abschätzung notwendiger Reichweiten zur Erzielung eines möglichst hohen technischen Marktpotenzials ist es vielmehr notwendig, den Anteil von Fahrleistungen, die mit Umlaufplänen einer Fahrleistungsklasse erbracht werden, zu analysieren. In Abbildung 3-3 und Abbildung 3-4 wird im Gegensatz zu den vorherigen Abbildungen deutlich, dass etwa 55 bis 65 % aller Fahrleistungen durch Umlaufpläne mit einer Fahrleistung von mehr als 200 km abgedeckt werden. Bezieht man alle Umlaufpläne mit einer Fahrleistung von über 150 km in die Betrachtung ein, so werden insgesamt zwischen 70 und 81 % aller Fahrleistungen abgedeckt, wobei zusätzlich noch kurze Umlaufpläne in Kombination bedient werden können.

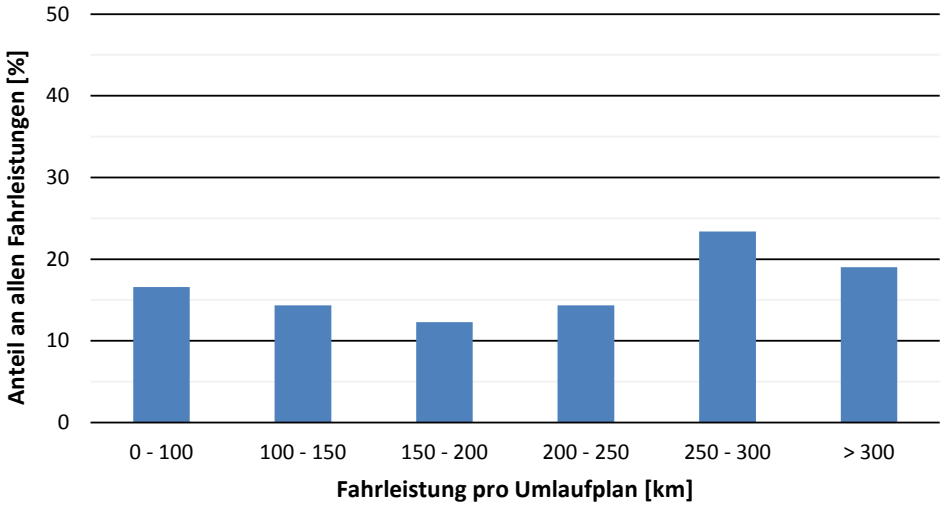

Abbildung 3-3
Einteilung der Fahrleistungen an Schultagen in einzelne Fahrleistungsklassen, Standardbusse

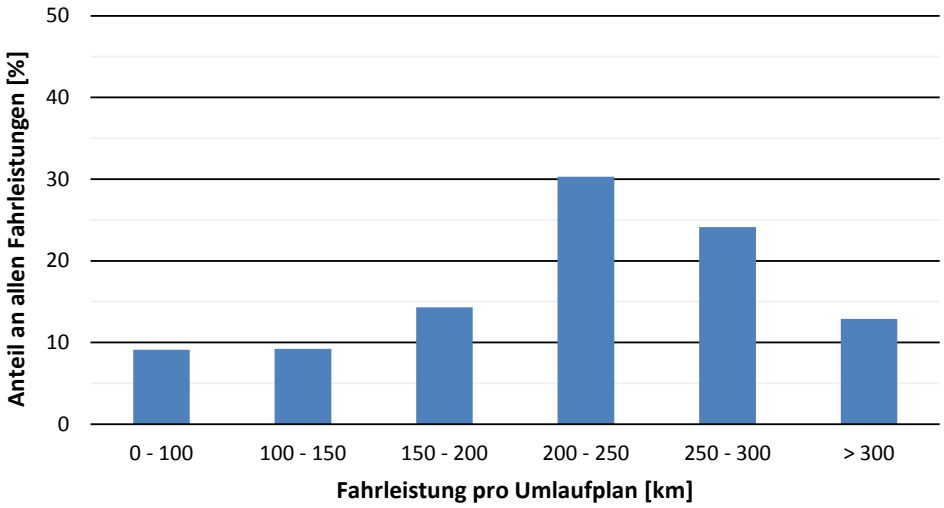

Abbildung 3-4

Einteilung der Fahrleistungen an Schultagen in einzelne Fahrleistungsklassen, Gelenkbusse

An Ferientagen (Mo – Fr) verschieben sich die Anteile zusätzlich in Richtung längerer Umlaufpläne, da viele Verstärkerfahrten und somit kurze Umlaufpläne wegfallen.

Abbildung 3-5 und Abbildung 3-6 zeigen als Ergänzung die Ergebnisse für Wochenenden und Feiertage. Diese wurden aus Übersichtsgründen zusammengefasst. An diesen Verkehrstagen steigt der Anteil der Fahrleistungen von Standardbussen, die in Umlaufplänen > 200 km erbracht werden, nochmals auf über 70 % an. Hingegen sinken die Anteile von in langen Umlaufplänen erbrachten Fahrleistungen von Gelenkbussen.

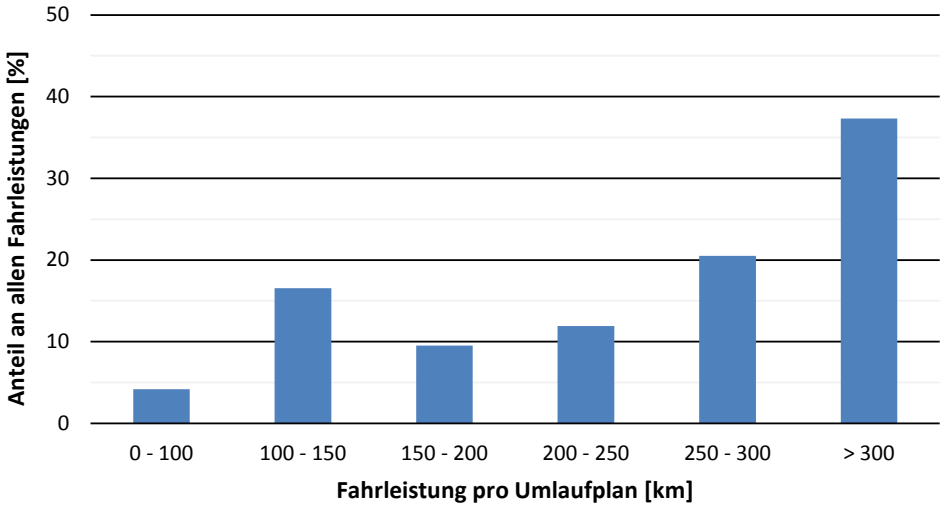

Abbildung 3-5
Einteilung der Fahrleistungen an Wochenenden und Feiertagen in einzelne Fahrleistungsklassen, Standardbusse

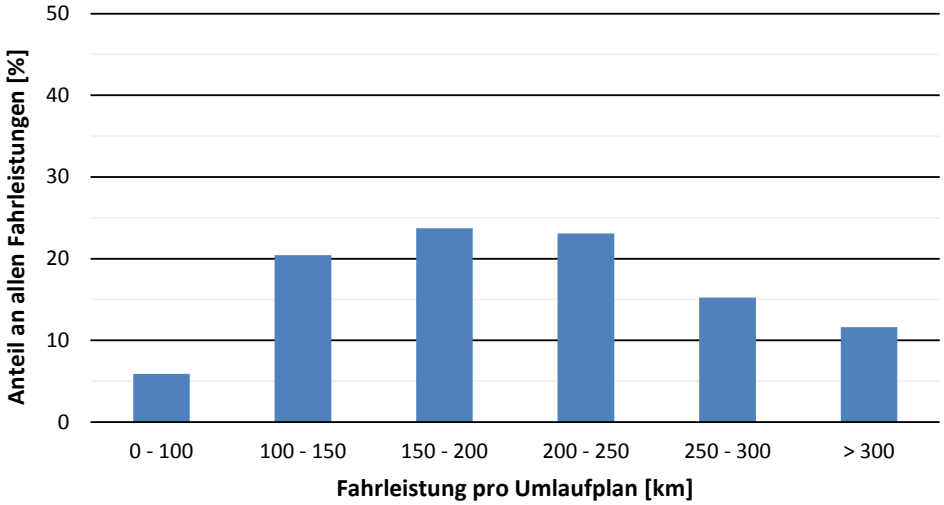

Abbildung 3-6

Einteilung der Fahrleistungen an Wochenenden und Feiertagen in einzelne Fahrleistungsklassen, Gelenkbusse

In Summe zeigen die Ergebnisse, dass es bei der Ermittlung des technischen Marktpotenzials sowie der Anforderungen unumgänglich ist, sich auf Umlaufpläne mit einer Fahrleistung von mehr als 150 km zu konzentrieren, da Neuanschaffungen von Bussen in erster Linie auf diese Umlaufpläne abzielen.

3.1.3 Ableitung technischer Anforderungen an Volllader

Abbildung 3-7 und Abbildung 3-8 zeigen die Summenkurven der aufsteigend sortierten Fahrleistungen > 150 km für Schultage. Unterstellt man, dass sich das technische Marktpotenzial auf diese Umlaufpläne beschränkt, so sind mit einer Mindestreichweite von 200 km ohne Nachladung zwischen 25 und 30 % dieser Umlaufpläne abdeckbar. Bei einer Erneuerungsrate der Fahrzeugflotten von

jährlich acht Prozent könnten somit aus technischer Sicht theoretisch drei bis vier Jahre alle neuen Fahrzeuge als sog. Volllader beschafft werden.

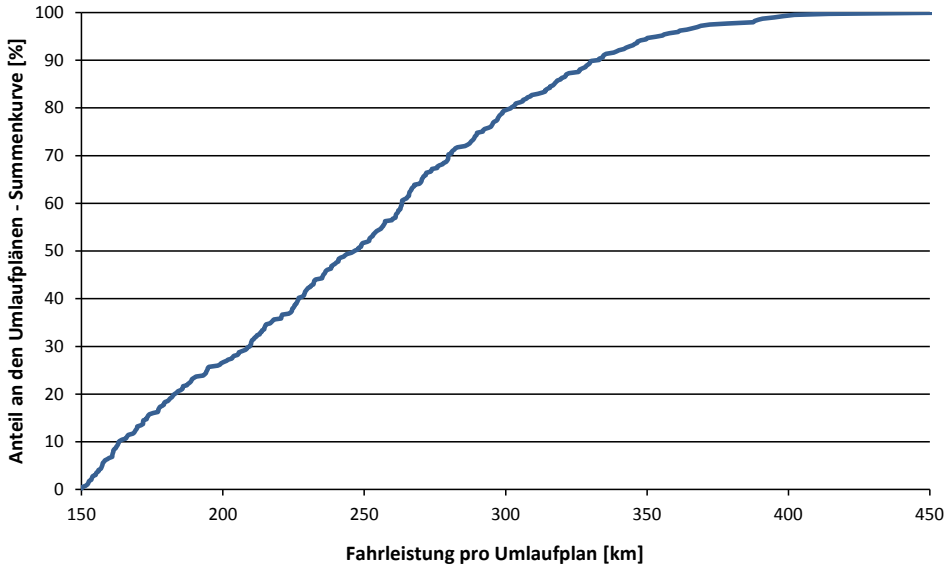

Abbildung 3-7

Summenkurve der Fahrleistungen an Schultagen > 150 km, Standardbusse

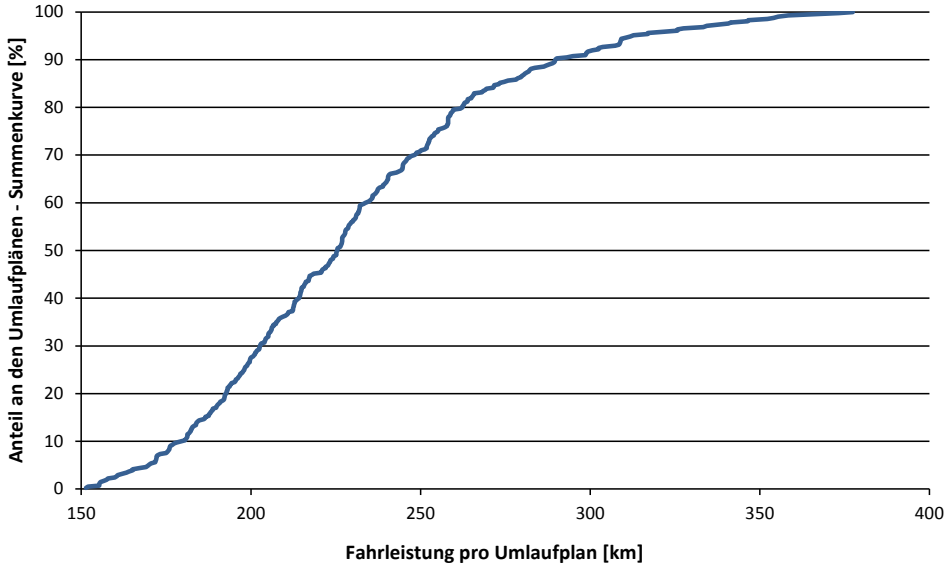

Abbildung 3-8

Summenkurve der Fahrleistungen an Schultagen > 150 km, Gelenkbusse

Das tatsächliche Marktpotenzial wird jedoch deutlich darunter liegen, da

1. hierbei vom Prinzip, Neufahrzeuge möglichst auf Umlaufplänen mit hoher Fahrleistung einzusetzen, abgewichen werden müsste und
2. die Wirtschaftlichkeit von Batteriebussen zusätzlich vermindert wäre, da die Einsparungen an Betriebskosten geringer ausfallen würden als bei hohen Fahrleistungen pro Umlaufplan.

Kurz- bis mittelfristig ist es somit notwendig, Fahrzeuge mit einer Reichweite von mindestens 250 km anzubieten. Diese sollten mit modular skalierbaren Energiespeichern ausgestattet sein, um Kundenanforderungen mit geringerer Reichweite bedienen zu können. Es erscheint jedoch nicht sinnvoll, Fahrzeuge mit einer Reichweite von unter 150 km zu versehen, sofern es sich dabei nicht um Fahrzeuge für eine Nachladestrategie mit Gelegenheitsladung handelt.

Aus den Anforderungen lassen sich unmittelbar Aussagen hinsichtlich der Beheizung der Fahrzeuge ableiten. Da eine rein elektrische Beheizung beim gegenwärtigen Stand der Technik mit enormen Reichweiteverlusten verbunden ist, sollte sowohl politisch als fördertechnisch die Option einer Brennstoffheizung zugelassen sein.

Langfristig werden Batteriebusse mit einer Reichweite von 350 km (Standardbusse) und 300 km (Gelenkbusse) notwendig sein. Damit lassen sich jeweils über 90 % aller Fahrleistungen abdecken. Bei darüber hinausgehenden Fahrleistungen erscheinen Änderungen in den Umlaufplänen oder eine Nachladestrategie mit Gelegenheitsladung als gerechtfertigte Alternativen, da nur ein geringer Teil der Umlaufpläne betroffen wäre.

3.2 Batteriebusse mit Gelegenheitsladung

Gleicht man die in Kapitel 3.1 abgeleiteten Anforderungen an die Reichweite von Batteriebussen mit den kurz- bis mittelfristig zur Verfügung stehenden Batterietechnologien sowie elektrischen Heizungskonzepten ab, so wird deutlich, dass

1. ein nicht unerheblicher Teil der erbrachten Fahrleistungen noch nicht abgedeckt werden kann und
2. derzeit für Volllader mit rein elektrischer Heizung unter mitteleuropäischen Klimabedingungen in Deutschland praktisch kein Markt besteht, da Reichweiten über 150 km kaum realisierbar sind, wenn von einem Ganzjahreseinsatz, also auch an kalten Tagen ausgegangen wird.

Dies gilt insbesondere für Gelenkbusse auf stark belasteten Linien mit hohen energetischen Anforderungen. Erschwerend kommt hinzu, dass sich die Längen der Umlaufpläne zwischen Verkehrsunternehmen deutlich unterscheiden. Neben örtlichen Gegebenheiten wie Linienlängen und Fahrzeiten spielen hierbei Fragen der Pausengewährung, der Dienstplanerstellung sowie innerbetriebliche Tarifregelungen eine erhebliche Rolle.

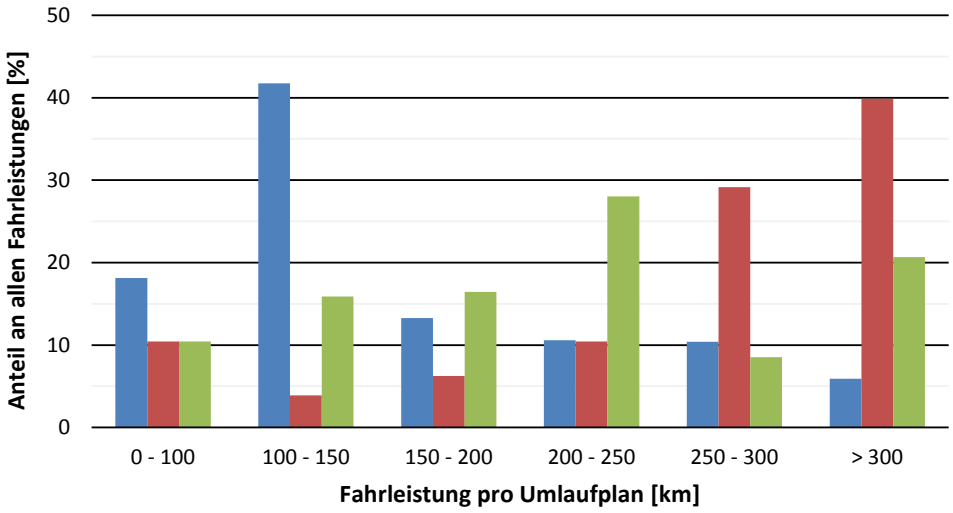

Abbildung 3-9

Vergleich der Fahrleistungen von drei Verkehrsunternehmen an Schultagen, Standardbusse

Abbildung 3-9 und Abbildung 3-10 zeigen die Verteilungen der Fahrleistungen von drei in etwa miteinander vergleichbarer Verkehrsunternehmen aus deutschen Großstädten.

Zu erkennen ist, dass das blau gekennzeichnete Verkehrsunternehmen den überwiegenden Teil seiner Fahrleistungen mit Volladern bereits heute abdecken kann, sofern keine rein elektrische Heizung gefordert wird.

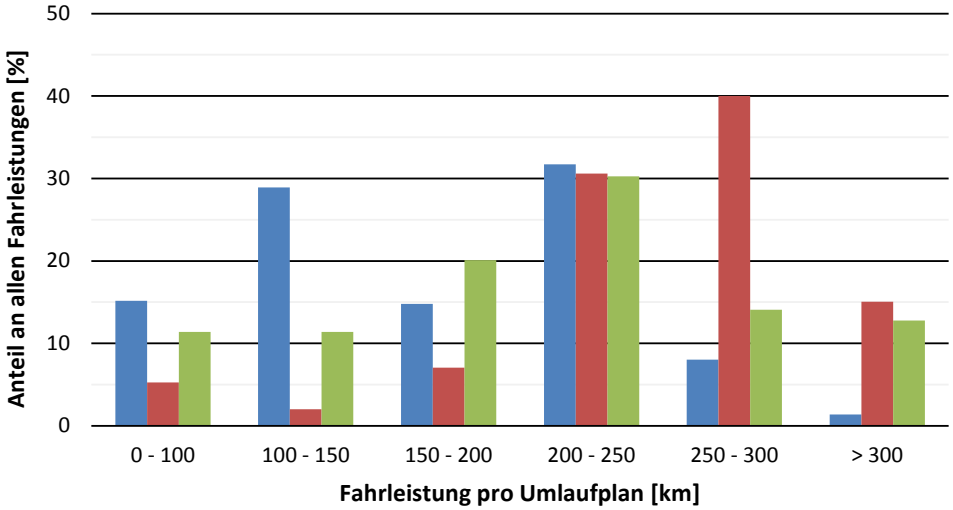

Abbildung 3-10

Vergleich der Fahrleistungen von drei Verkehrsunternehmen an Schultagen, Gelenkbusse

Hingegen wird das rot gekennzeichnete Verkehrsunternehmen gezwungen sein, auf Fahrzeuge mit Gelegenheitsladung zurückzugreifen, da der größte Teil der Fahrleistungen in Umlaufplänen > 250 km erbracht wird. Das grün gekennzeichnete Verkehrsunternehmen kann eine zweigeteilte Strategie verfolgen, bei dem die Entwicklung der Reichweiten beobachtet und zur Not auf Fahrzeuge mit Gelegenheitsladung zurückgegriffen werden kann.

Als Fazit bleibt, dass für eine umfassende Einführung von Batteriebussen in den nächsten Jahren alternative Nachladekonzepte, bei denen Batteriebusse während eines Umlaufplans nachgeladen werden können, unabdingbar sind.

Zu beantworten ist die Frage, mit welcher Konfiguration aus fahrzeugseitigem Energiespeicher und Ladeleistung welcher Anteil an Umlaufplänen mit einer Fahrleistung von mehr als 200 km bedient werden kann.

3.2.1 Datengrundlage

Als Datengrundlage für die Ermittlung des technischen Marktpotenzials von Batteriebussen mit Gelegenheitsladung dienten zunächst 258 Umlaufpläne für Schultage mit einer Fahrleistung von mehr als 200 km aus 15 verschiedenen Verkehrsunternehmen. Diese teilen sich in 149 Umlaufpläne für Standard- und 109 Umlaufpläne für Gelenkbusse auf.

3.2.2 Ableitung technischer Anforderungen an Batteriebusse mit Gelegenheitsladung

Die o. g. Umlaufpläne wurden vereinfachten Energiebilanzierungen unterzogen. Bei vereinfachten Energiebilanzierungen wird anhand von Verbrauchs- und Nachladeparametern über einen Einsatztag bzw. Umlaufplan hinweg geprüft ob zu jedem Zeitpunkt ausreichend elektrische Energie im Elektroenergiespeicher eines Busses vorhanden ist. Ist zu jedem Zeitpunkt die Bedingung

$$E_{ES} + \Sigma E_{NL} \geq \Sigma E_{TR} + \Sigma E_{NV} + E_{RE}$$

E_{ES} nutzbarer Energieinhalt im Elektroenergiespeicher [kWh]
E_{NL} bis zum betrachteten Zeitpunkt im Betrieb nachladbare Energie [kWh]
E_{TR} bis zum betrachteten Zeitpunkt durch die Traktion verbrauchte Energie [kWh]
E_{NV} bis zum betrachteten Zeitpunkt durch Nebenverbraucher verbrauchte Energie [kWh]
E_{RE} nicht zu unterschreitende Energiereserve [kWh]

erfüllt, ist ein Umlaufplan für den Einsatz von Batteriebussen geeignet.

Naturgemäß hängen die Verbrauchswerte, ausgedrückt als spezifische Energieverbräuche (kWh/km), von verschiedenen Einflussfaktoren ab. Diese wurden wie folgt berücksichtigt:

- Fahrgastnachfrage: Originaldaten der Verkehrsunternehmen und eigene Zählwerte aus Untersuchungen
- Höhenprofile: Originaldaten der Verkehrsunternehmen und eigene Erhebungen
- Reisegeschwindigkeit: Originaldaten der Verkehrsunternehmen und eigene Messungen
- Außentemperatur: Festlegung maßgebender minimaler und maximaler Werte in Zusammenarbeit mit den Verkehrsunternehmen basierend auf Wetterdaten des DWD. Hierzu wurden folgende maßgebende Tage definiert:
  - T-Tag 1 – warmer und sonniger Sommertag
  - T-Tag 2 – Übergangstag mit 15°C
  - T-Tag 3 – kalter und bedeckter Wintertag
- Heizung: Unterscheidung in BH – Brennstoffheizung (Heizöl o. ä.) und vollelektrische Heizung – VEH
- Klimatisierung: Unterscheidung in ΔT-Klimatisierung – ΔTK und ausschließliche Fahrerplatzklimatisierung – FPK

Einen Überblick über die in den 15 Verkehrsunternehmen mittels Fahrzeugsimulationen ermittelten spezifischen Energieverbrauchswerte enthält Tabelle 3-1.

	Fall 1	**Fall 2**	**Fall 3**
Heizung / Klimatisierung	BH + FPK	BH + ΔTK	VEH
Maßgebender Tag	Tag 2	Tag 1	Tag 3
Spezifischer Energieverbrauch Standardbusse [kWh/km]	1,1 – 1,3	1,3 – 1,5	1,9 – 2,4
Spezifischer Energieverbrauch Gelenkbusse [kWh/km]	1,5 – 1,8	1,6 – 2,1	2,7 – 3,2

Tabelle 3-1: Ermittelte spezifische Energieverbrauchswerte

Bei der Berücksichtigung des Betriebsablaufs wurde wie folgt vorgegangen:

1. Nutzung der Umlaufpläne wie übergeben. Dabei wurden nach jeweiliger Absprache mit den Verkehrsunternehmen pauschale Verspätungen

zwischen zwei und fünf Minuten eingerechnet, die von den Wendezeiten und somit den möglichen Ladezeiten abgezogen wurden.

2. Verwendung von Messdaten inkl. der realen Fahr- und Wendezeiten, sofern vorhanden.
3. Reserveenergie, um einen kompletten Umlauf sowie die Rückkehr zum Betriebshof realisieren zu können.

Naturgemäß hängt das technische Einsatzpotenzial von Batteriebussen direkt von der Anzahl der Schnellladestationen ab, mit deren Hilfe der fahrzeugseitige Energiespeicher nachgeladen werden kann. Wie in Kapitel 2.8.4 dargelegt wurde, ist der Kauf und die Errichtung von Schnellladestationen mit hohen Kosten verbunden. Um die Ergebnisse nicht durch einen unrealistisch hohen Einsatz von Schnellladestationen zu verzerren, wurde deren Einsatz wie folgt begrenzt:

1. Mindestanzahl von Bussen auf einer Linie / einem Linienbündel: 2
2. 2 – 4 Busse auf einer Linie / einem Linienbündel: max. 1 Ladestation
3. 5 – 8 Busse auf einer Linie / einem Linienbündel: max. 2 Ladestationen
4. 9 – 11 Busse auf einer Linie / einem Linienbündel: max. 3 Ladestationen
5. etc.

Dabei wurden die Schnellladestationen gedanklich ausschließlich an Endhaltestellen bzw. in der Nähe befindlichen Parkmöglichkeiten platziert.

3.2.3 Ergebnisse – Standardbusse

In einem ersten Schritt wird der Fall 1, also ein Übergangstag ohne Anforderungen an die Klimatisierung oder Beheizung der Fahrzeuge betrachtet. Er bildet die Untergrenze hinsichtlich der spezifischen Energieverbräuche.

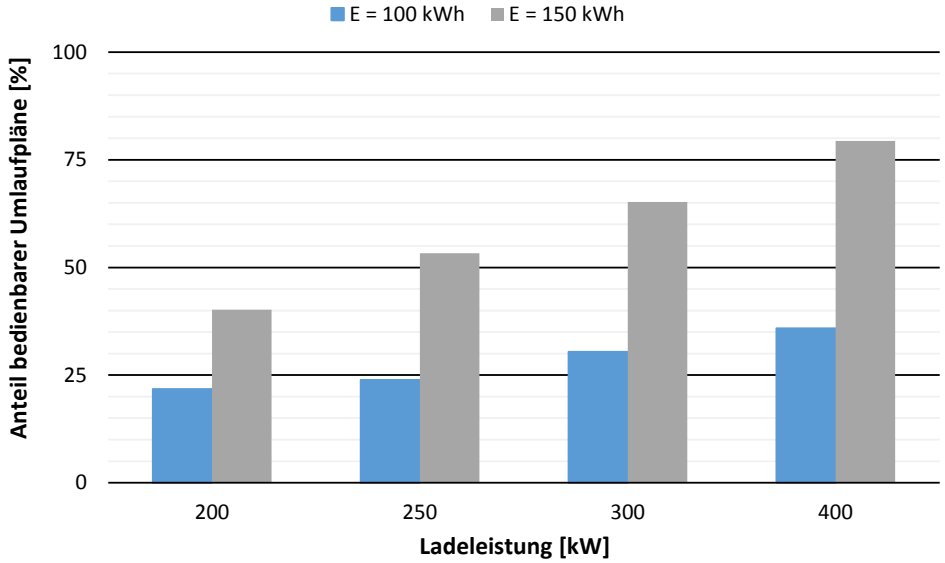

Abbildung 3-11

Anteil bedienbarer Umlaufpläne bei einem nutzbarem Energieinhalt von 100 bzw. 150 kWh, Standardbusse – Fall 1

In Abbildung 3-11 und Abbildung 3-12 wird deutlich, dass mit Fahrzeugen, die nur einen nutzbaren Energieinhalt von maximal 100 kWh mitführen, zwischen 22 und 35 % der Umlaufpläne bedient werden können. Hierbei spielt die Ladeleistung nur eine untergeordnete Rolle.

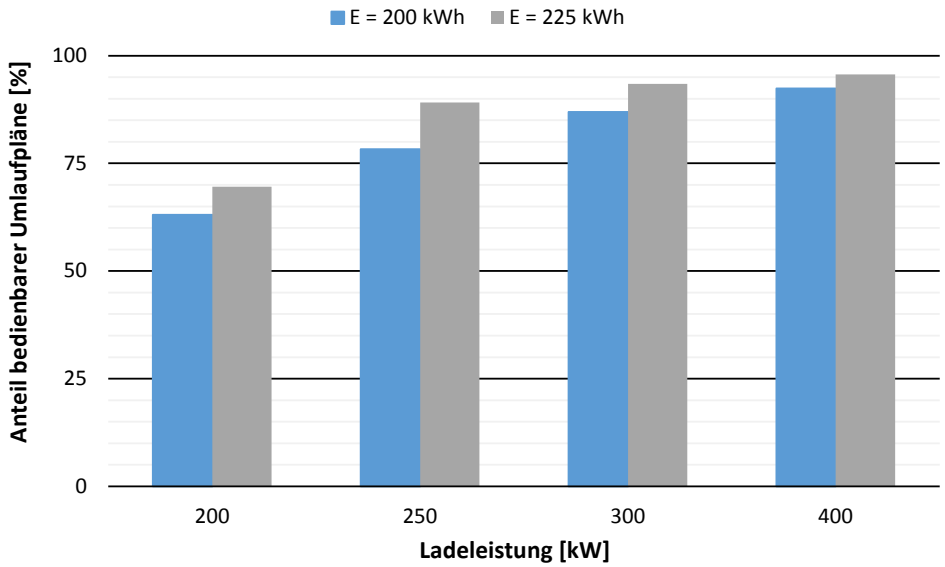

Abbildung 3-12

Anteil bedienbarer Umlaufpläne bei einem nutzbarem Energieinhalt von 200 bzw. 225 kWh, Standardbusse – Fall 1

Bei der Ergebnisinterpretation ist zu beachten, dass größere Störungen oder Umleitungen nicht mit betrachtet wurden. Aus Sicht einer stabilen und abgesicherten Betriebsdurchführung sollte auf kleine Energiespeicher generell verzichtet werden.

Die Mindestzielgröße hinsichtlich des nutzbaren Energieinhaltes und der zugehörigen Ladeleistung sollte bei 200 kWh und 250 kW liegen. Damit wären über 75 % aller Umlaufpläne mit Gelegenheitsladung bedienbar. Zusätzlich wäre für die Mehrzahl der Einsatzfälle eine Robustheit gegenüber Störungen gegeben.

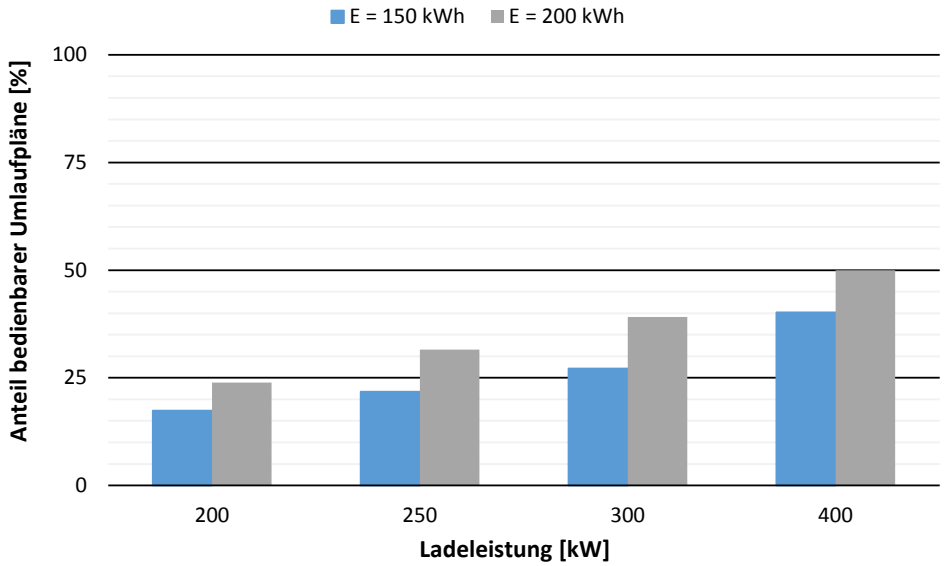

Abbildung 3-13

Anteil bedienbarer Umlaufpläne bei einem nutzbarem Energieinhalt von 150 bzw. 200 kWh, Standardbusse – Fall 3

In einem zweiten Schritt wurde der Fall 3, also die rein elektrische Beheizung auf dem gegenwärtigen Stand der Technik analysiert. Bei tiefen Temperaturen handelt es sich dabei praktisch um elektrische Widerstandsheizungen, da hierbei der sog. COP (Coefficient of Performance) von Wärmepumpen, also das Verhältnis von abgegebener Heizleistung zu aufgewendeter elektrischer Leistung gegen Eins geht. Damit einher geht eine signifikante Erhöhung des

spezifischen Energieverbrauchs und eine Reduzierung der Reichweite ohne Nachladung.

Wie in Abbildung 3-13 und Abbildung 3-14 zu erkennen ist, gibt es beim gegenwärtigen Stand elektrischer Heizungskonzepte nur einen sehr eingeschränkten Markt für Standardbatteriebusse, die einen nutzbaren Speicherinhalt von weniger als 250 kWh mitführen. Die Untergrenze für die Ladeleistung beträgt dabei 300 kW.

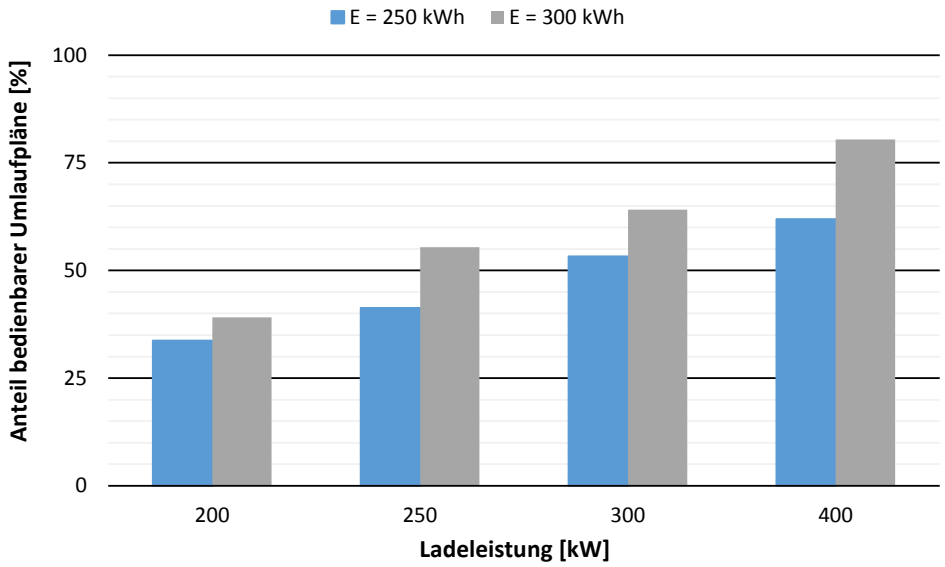

Abbildung 3-14

Anteil bedienbarer Umlaufpläne bei einem nutzbarem Energieinhalt von 250 bzw. 300 kWh, Standardbusse – Fall 3

Der Fall 2, liegt hinsichtlich der Abdeckungsgrade zwischen den Fällen 1 und 3.

3.2.4 Ergebnisse – Gelenkbusse

In einem ersten Schritt wird wiederum der Fall 1 betrachtet. Wie aus Abbildung 3-15 und Abbildung 3-16 zu erkennen ist, gibt es praktisch keinen Markt für Batteriegelenkbusse mit Gelegenheitsladung, die einen nutzbaren Energiegehalt von 100 kWh oder darunter mitführen. Hierbei wurden Reserven für größere Störungen im Betriebsablauf noch nicht einmal berücksichtigt.

Die Abdeckungsraten für einen nutzbaren Energieinhalt von 150 bzw. 200 kWh sind mit denen von Standardbussen in etwa vergleichbar. Der Hintergrund sind die typischen Einsatzbedingungen für Gelenkbusse, die im Vergleich zu Standardbussen weniger extrem lange Umlaufpläne aufweisen, häufiger linienrein eingesetzt werden und weniger in den Tagesrandlagen Fahrten auf anderen Linien absolvieren.

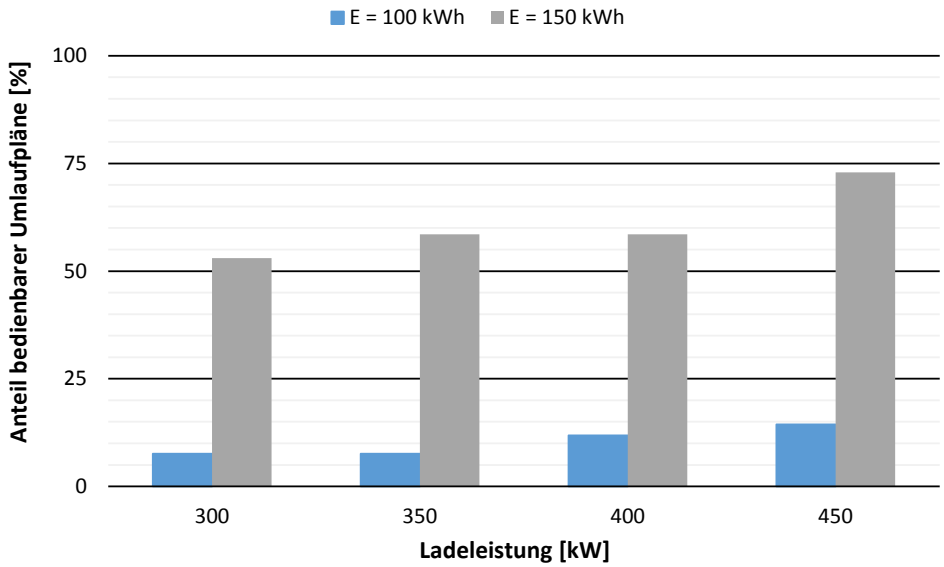

Abbildung 3-15

Anteil bedienbarer Umlaufpläne bei einem nutzbarem Energieinhalt von 100 bzw. 150 kWh, Gelenkbusse – Fall 1

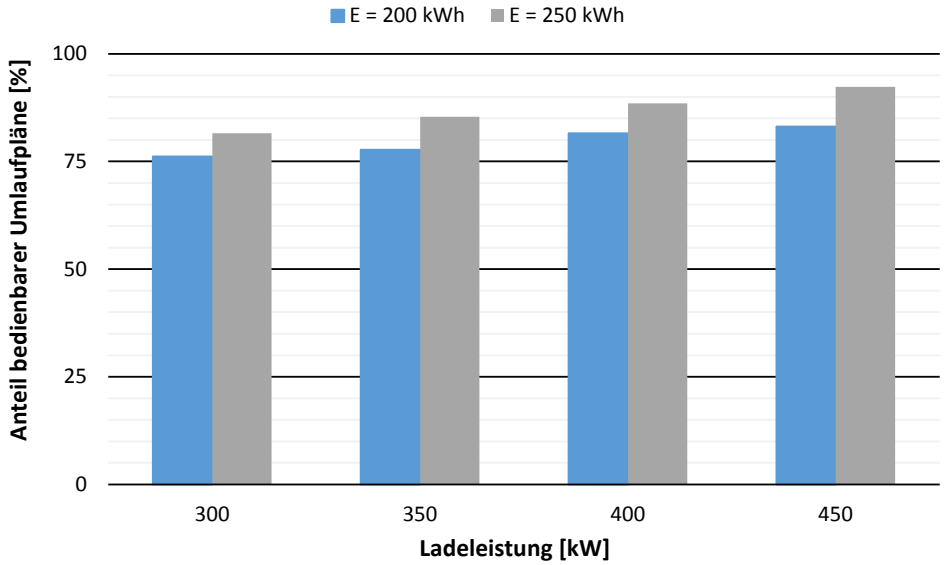

Abbildung 3-16

Anteil bedienbarer Umlaufpläne bei einem nutzbarem Energieinhalt von 200 bzw. 250 kWh, Gelenkbusse – Fall 1

Noch deutlicher als bei Standardbussen wirkt sich bei Gelenkbussen der Energiemehrverbrauch durch eine rein elektrische Beheizung aus. Insbesondere die Werte in Abbildung 3-17 machen deutlich, dass bei einer rein elektrischen Beheizung nutzbare Energiemengen von deutlich über 150 kWh mitgeführt werden müssen. Selbst bei vergleichsweise großen Energiespeichern mit 200 bzw. 250 kWh nutzbarem Energieinhalt und einer hohen Ladeleistung von 450 kW könnten gerade einmal zwischen 55 und 65 % der analysierten Umlaufpläne bedient werden.

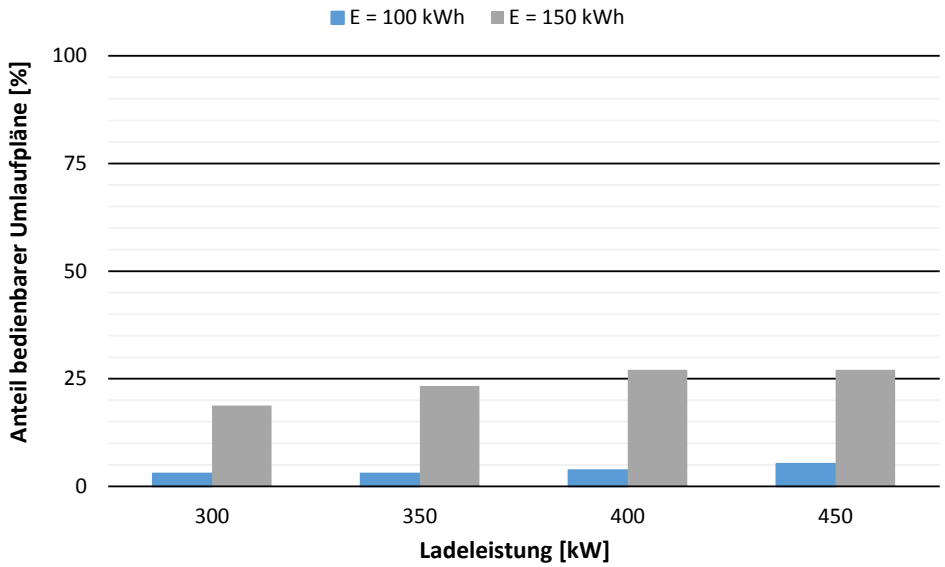

Abbildung 3-17

Anteil bedienbarer Umlaufpläne bei einem nutzbarem Energieinhalt von 100 bzw. 150 kWh, Gelenkbusse – Fall 3

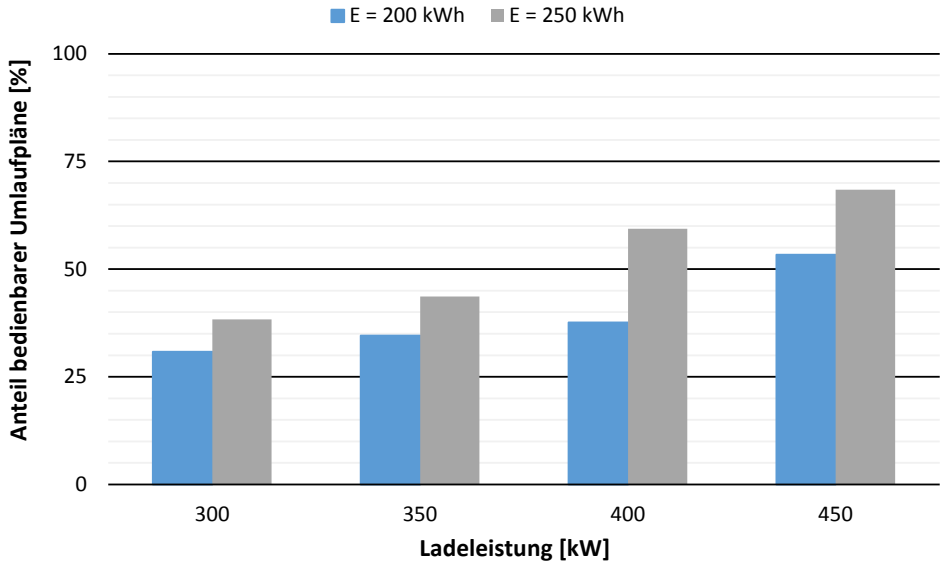

Abbildung 3-18

Anteil bedienbarer Umlaufpläne bei einem nutzbarem Energieinhalt von 200 bzw. 250 kWh, Gelenkbusse – Fall 3

3.2.5 Fazit

Die Ergebnisse in den vorangegangenen Abschnitten zeigen, dass für Batteriebusse mit vergleichsweise kleinen Energiespeichern auch unter Einsatz hoher Ladeleistungen an Endhaltestellen nur ein kleiner Markt besteht. Fahrzeugkonzepte sollten von daher verstärkt auf große Energiespeicher ausgelegt werden.

Die Ergebnisse für den Fall 3, bei dem ein rein elektrisches Heizen betrachtet wurde, führen zu folgenden Schlussfolgerungen:

1. Auch für Batteriebusse mit Gelegenheitsladung sollten vorläufig noch mit Brennstoffheizungen als alternative Form der Beheizung angeboten werden.
2. Eine Intensivierung der F&E-Anstrengungen im Bereich hocheffizienter elektrischer Heizungskonzepte ist dringend angezeigt.

3. Konzepte, bei denen während des Nachladens ein fahrzeugseitiger Wärmespeicher vorgeladen wird, sollten als Alternative betrachtet werden.

4 Zielkosten für Batteriebusse und Ladeinfrastruktur

Als Zielkosten im Sinne der Untersuchung werden diejenigen Beschaffungskosten für Batteriebusse und die zugehörige Ladeinfrastruktur definiert, die zu einer Kostengleichheit gegenüber konventionellen Dieselbussen führen würden. Deren Berechnung erfolgt auf der Annahme, dass Batteriebusse mit dem gleichen oder einem nur unwesentlich höheren Personaleinsatz betrieben werden können wie Dieselbusse. Daher ist ein Vollkostenvergleich zu Dieselbussen nicht notwendig, da nur sich unterscheidende Kostenpositionen berücksichtigt werden müssen.

4.1 Mengengerüst

Unterstellt wird ein Verkehrsunternehmen mit 150 Fahrzeugen, je 75 Standard- und 75 Gelenkbusse. Die Ergebnisse sind im Wesentlichen aber auch auf andere Betriebshofgrößen übertragbar, da nur wenige und in der Summe kaum relevante Kostenpositionen nicht linear skalierbar sind. Hierzu gehören die Werkstattausrüstung sowie die Anschlusskosten für den Betriebshof als nennenswerte Sprungfunktionen.

4.2 Fahrzeugkonfiguration

Batteriebusse werden bereits heute am Markt angeboten. Sie sind i. d. R. mit Energiespeichern ausgerüstet, die bzgl. ihrer Größe und ihres Gewichts zum gegenwärtigen Zeitpunkt in Linienbussen verbaut werden können, ohne dabei die Beförderungskapazität übermäßig einzuschränken. Verglichen mit den Ergebnissen aus Kapitel 3 verfügen diese Energiespeicher jedoch noch über zu wenig nutzbaren Energieinhalt. Eine Zielkostenbetrachtung mit Hilfe von derzeit am Markt angebotenen Batteriebussen ist von daher nicht zielführend, da für diese Fahrzeuge keine massenhafte Marktnachfrage vorhanden sein wird.

Für die Ermittlung der Zielkosten wurden somit vier Fahrzeuge konfiguriert, je zwei Varianten für Standard- und Gelenkbusse, die sich wiederum in sog. Volllader und Fahrzeuge mit Gelegenheitsladung unterscheiden. Diese wurden bewusst mit Energiespeichern versehen, die für einen Massenmarkt geeignet sind, jedoch heute aufgrund ihres Gewichtes und ihrer Kosten noch nicht verbaut werden können. Nachfolgend werden die Konfigurationen als Zielkonfigurationen bezeichnet. Darüber hinaus wurden einheitlich die folgenden Ausstattungsmerkmale unterstellt:

- Zentralmotor(en) mit Antriebsachse(n)
- drei Spannungsebenen (DC-Zwischenkreisspannung, 400 V AC, 24 V DC)
- Pantograph auf Fahrzeugdach (nur bei Gelegenheitsladung)
- elektrische Teilklimatisierung des Fahrgastraums
- elektrische Vollklimatisierung des Fahrerarbeitsplatzes
- diesel-elektrische Zusatzheizung
- Energiespeicher gemäß Tabelle 4-1

Die sich daraus ergebenden Quasi-Ist-Kosten für das Jahr 2017 sind in Tabelle 4-1 aufgelistet.

	Standardbus Volllader	Standardbus Gelegenheits-ladung	Gelenkbus Volllader	Gelenkbus Gelegenheits-ladung
Energiespeichertyp	Hochenergie	Hochleistung	Hochenergie	Hochleistung
Energieinhalt nominell	350 kWh	250 kWh	400 kWh	300 kWh
Kosten Energiespeicher	262.500 €	250.000 €	300.000 €	300.000 €
Gesamtkosten	674.500 €	673.000 €	876.000 €	887.000 €

Tabelle 4-1: Angenommene Ausgangskosten für Batteriebusse mit Zielkonfiguration

Die Ermittlung der angesetzten Fahrzeugkosten ist in Kapitel 5 ersichtlich. Hinzugerechnet wurden noch 30.000 € für spezifische Ausrüstungen der Verkehrsunternehmen, beispielsweise rechnergestützte Betriebsleitsysteme (RBL), Fahrgastinformationssysteme, Verkaufssysteme etc.

Die Nutzungsdauer der Fahrzeuge wurde einheitlich mit 14 Jahren angenommen, die der Energiespeicher mit 7 Jahren. Als Restwert wurden 4 % des Neupreises und als kalkulatorischer Zins 3 % veranschlagt.

4.3 Ladeinfrastruktur

	Standardbus Volllader	Standardbus Gelegenheits-ladung	Gelenkbus Volllader	Gelenkbus Gelegenheits-ladung
Ladegerät – Anzahl	0,9 / Bus			
Ladegerät – Kosten	40.000 €	35.000 €	50.000 €	40.000 €
Ladegerät – anteilige Anschluss- und Installationskosten	15.000 €			
Ladegerät – Nutzungsdauer	14 a			
Ladegerät – jährliche W&I-Kosten	2 % bezogen auf die Investitionskosten			
Ladestationen – Anzahl	-	1 / 4 Busse	-	1 / 4 Busse
Ladestation – Ladeleistung	-	250 kW	-	350 kW
Ladestation – Kosten	-	250.000 €	-	350.000 €
Ladestation – Nutzungsdauer	-	20 a	-	20 a
Ladegerät – jährliche W&I-Kosten	-	2 %	-	2 %
Ladestation – Anschlusskosten	-	80.000 €	-	90.000 €
Nutzungsdauer Anschlusskosten	30 a			

Tabelle 4-2: Mengenmodell, angenommene Ausgangskosten und Nutzungsdauer für Ladeinfrastruktur

Die Ladeinfrastruktur wird unterteilt in Ladegeräte, mit deren Hilfe auf Betriebshöfen die Energiespeicher langsam geladen werden und Ladestationen für die Schnellladung an Endhaltestellen.

4.4 Vergleichsfahrzeuge

Als Vergleichsfahrzeuge werden konventionelle Dieselbusse mit EURO VI-Abgasnorm betrachtet. Hierfür werden Beschaffungskosten von 240.000 € und 350.000 € und eine einheitliche Nutzungsdauer von 12 Jahren unterstellt. Als Restwert wurde wiederum 4 % des Neupreises veranschlagt.

4.5 Kosten für Betrieb

Die Parameter und Kostensätze für den Betrieb der Fahrzeuge sind in Tabelle 4-3 aufgelistet. Als jährliche Fahrleistung wird einheitlich von 65.000 km ausgegangen.

durchschnittlicher Energieverbrauch Standardbatterieb. [kWh / km]	1,2
durchschnittlicher Energieverbrauch Gelenkbatteriebusse [kWh / km]	1,7
durchschnittlicher Heizölverbrauch Standardbatteriebusse [l / km]	0,04
durchschnittlicher Heizölverbrauch Gelenkbatteriebusse [l / km]	0,06
Elektroenergiepreis – Ausgangswert [€ / kWh]	0,17
Energiepreissteigerung [% / a]	2
Wartungs- und Instandhaltungsk. Standardbatteriebus [€ / km]	0,24
Wartungs- und Instandhaltungskosten Gelenkbatteriebus [€ / km]	0,30
durchschnittlicher Dieselverbrauch Standarddieselbusse [l / km]	0,42
durchschnittlicher Dieselverbrauch Gelenkdieselbusse [l / km]	0,55
durchschnittlicher AdBlue-Verbrauch Standarddieselbusse [l / km]	0,008
durchschnittlicher AdBlue-Verbrauch Gelenkdieselbusse [l / km]	0,018
Dieselpreis / Heizöl – Ausgangswert [€ / l]	0,95
jährliche Preissteigerung Diesel / Heizöl [% / a]	3
AdBlue-Preis – Ausgangswert [€ / l]	0,15
jährliche Preissteigerung AdBlue [% / a]	2
Wartungs- und Instandhaltungskosten Standarddieselbus [€ / km]	0,28
Wartungs- und Instandhaltungskosten Gelenkdieselbus [/ km]	0,35

Tabelle 4-3: Parameter und Kostensätze für den Busbetrieb

4.6 Kosten für Werkstattausrüstung

In die Kosten für die zusätzliche Werkstattausrüstung wurden

- ein 18 m Dacharbeitsstand inkl. Krananlage (1 t) – 165.000 €,
- notwendige Spezialwerkzeuge – 8.000 €,
- Diagnoseausrüstung für die Batteriefahrzeuge – 95.000 € sowie
- die notwendige Schutzausrüstung – 2.000 €

eingerechnet. Die zugehörigen Nutzungsdauern sind Tabelle 4-4 zu entnehmen.

Nutzungsdauer Dacharbeitsplatz [a]	20
Nutzungsdauer sonstige Werkstattausrüstung [a]	5

Tabelle 4-4: Nutzungsdauer der Werkstattausrüstung

4.7 Schulungskosten

Hinsichtlich der Schulungskosten für das Fahr- und Werkstattpersonal wurde auf Berechnungen aus Praxisbeispielen zurückgegriffen. Die Anzahl der Fahrer wird mit 375 und die Anzahl der Werkstattmitarbeiter mit 45 angesetzt.

In Summe wurden daraus ableitend für eine Komplettschulung Kosten in Höhe von 120.000 € angesetzt. Unterstellt wurde eine Wiederholung der Schulungen aller fünf Jahre.

4.8 Ermittlung der Zielkosten

Unabhängig von der Nachladestrategie ist der Betrieb von Batteriebussen mit beträchtlichen Mehrkosten verbunden, sofern mit den Ausgangskosten für die Fahrzeuge und die Ladeinfrastruktur gerechnet wird. Im Einzelnen ergeben sich die in Tabelle 4-5 angegebenen Differenzkosten pro Fahrzeugkilometer.

Vergleichsfall	**Differenzkosten [€/Fz-km]**
Standardbus – Volllader vs. Dieselbus	0,53
Standardbus – Gelegenheitsladung vs. Dieselbus	0,60
Gelenkbus – Volllader vs. Dieselbus	0,63
Gelenkbus – Gelegenheitsladung vs. Dieselbus	0,72

Tabelle 4-5: Differenzkosten zwischen Dieselbus- und Batteriebusbetrieb (Batteriebusse mit Zielkonfiguration)

Setzt man zum Vergleich die Kosten für am Markt angebotene Batteriebusse an, so erhält man die in Tabelle 4-6 aufgeführten Differenzkosten pro Fahrzeugkilometer. Hierbei ist zu beachten, dass diese Fahrzeuge mit z. T. deutlich kleineren Energiespeichern ausgerüstet sind.

Vergleichsfall	**Fahrzeugpreis [€]**	**Differenzkosten [€/Fz-km]**
Standardbus – Volllader vs. Dieselbus	560.000	0,32
Standardbus – Gelegenheitsladung vs. Dieselbus	575.000	0,42
Gelenkbus – Volllader vs. Dieselbus	690.000	0,34
Gelenkbus – Gelegenheitsladung vs. Dieselbus	750.000	0,52

Tabelle 4-6: Differenzkosten zwischen Dieselbus- und Batteriebusbetrieb (Batteriebusse mit Ist-Konfiguration)

In den Folgeschritten wurden geringere Beschaffungskosten für die Batteriebusse mit Zielkonfiguration, unterschieden für Fahrzeuge, Batterien und Ladeinfra-

struktur angesetzt, um zu ermitteln, welche Zielkosten für einen kostenneutralen Betrieb notwendig wären. Zusätzlich wurde der zurzeit noch theoretische Fall einer Nutzungsdauer der Batterien von ebenfalls 14 Jahren für untersucht.

Untersuchungsfälle:

UF1: - Fahrzeugkosten -15 %
- Batteriekosten -25 %
- Ladeinfrastrukturkosten gleichbleibend

UF2: - Fahrzeugkosten -15 %
- Batteriekosten -50 %
- Ladeinfrastrukturkosten (ohne Anschlusskosten) -25 %

UF3: - Fahrzeugkosten -15 %
- Batteriekosten -50 %
- keine Ersatzbatterie für Gelegenheitsladung notwendig
- Ladeinfrastrukturkosten (ohne Anschlusskosten) -25 %

UF4: - Fahrzeugkosten -30 %
- Batteriekosten -50 %
- keine Ersatzbatterie notwendig
- Ladeinfrastrukturkosten (ohne Anschlusskosten) -30 %

Vergleichsfall	**Differenzkosten [€/Fz-km]**			
	UF1	**UF2**	**UF3**	**UF4**
Standardbus – Volllader vs. Dieselbus	0,35	0,17	0,17	-0,02
Standardbus – Gelegenheitsladung vs. Dieselbus	0,41	0,24	0,08	0,05
Gelenkbus – Volllader vs. Dieselbus	0,41	0,21	0,21	-0,02
Gelenkbus – Gelegenheitsladung vs. Dieselbus	0,50	0,28	0,10	0,03

Tabelle 4-7: Differenzkosten zwischen Dieselbus- und Batteriebusbetrieb (Batteriebusse mit Zielkonfiguration) mit reduzierten Beschaffungspreisen

Die Differenzkosten in Tabelle 4-7 zeigen, dass mit kurzfristig zu erwartenden Preisdegressionen für die Fahrzeuge und die Ladeinfrastruktur ein kostenneutraler Batteriebusbetrieb nicht möglich ist (UF1 – UF2). Erst mittelfristig ist ein Betrieb ohne Mehrkosten möglich, insbesondere dann, wenn ein Ersatz für die Batterien während der angesetzten Nutzungsdauer der Fahrzeuge nicht notwendig wird.

Legt man Untersuchungsfall 4 zugrunde, ergeben sich für die wichtigsten Investitionsgüter folgende inflationsbereinigte Beschaffungspreise um einen kostenneutralen Betrieb zu ermöglichen:

- Standardbus – Volllader: ca. 484.000 €
- Standardbus – Gelegenheitsladung: ca. 430.000 €
- Gelenkbus – Volllader: ca. 644.000 €
- Gelenkbus – Gelegenheitsladung: ca. 580.000 €
- Ladestationen: ca. 700 € / kW Ladeleistung
- Ladegeräte: ca. 600 € / kW Ladeleistung

Unterstellt man, dass für Volllader aufgrund der intensiveren Nutzung der Batterie auch zukünftig deren Tausch nach der halben Nutzungsdauer des Busses

notwendig sein wird, ergeben sich folgende inflationsbereinigte Beschaffungspreise um einen kostenneutralen Betrieb zu ermöglichen:

- Standardbus – Volllader: ca. 371.000 €
- Gelenkbus – Volllader: ca. 490.000 €

Es wurden keine Kostenrechnungen angestellt, bei denen Traktionsbatterien nach ihrer mobilen Nutzung einer stationären Weiterverwendung zugeführt werden.

5 Potenzial der Kostenreduktion von Batteriebussen und Ladeinfrastruktur

Kapitel 4 zeigt, dass der Betrieb von Batteriebussen im Vergleich zu Dieselbussen mit Mehrkosten verbunden ist, sofern gegenwärtige Beschaffungskosten für die Fahrzeuge und die Ladeinfrastruktur zugrunde gelegt werden. Vor dem Hintergrund angespannter öffentlicher Haushalte ist es somit notwendig, die Mehrkosten zu reduzieren, um elektrischen Busbetrieb nicht dauerhaft mit deutlichen Mehrkosten zu belegen.

Inhalt von Kapitel 5 sind Abschätzungen zum Kostenreduktionspotenzial von Batteriebussen und der zugehörigen Ladeinfrastruktur. Dabei wurde von folgenden Grundannahmen ausgegangen:

1. Die gegenwärtigen Kosten für Batteriebusse und Ladeinfrastruktur sind geprägt durch
   a) hohe Aufwendungen für Forschung und Entwicklung (F&E), die z. T. überproportional auf kleine Stückzahlen umgelegt werden
   b) praktisch keine Skaleneffekte, da Fahrzeuge derzeit fast nur in kleinen Stückzahlen bestellt und geliefert werden
   c) hohe Kosten für Kernkomponenten, insb. Batteriespeicher
   d) Risikoaufschläge, da Hersteller mit z. T. überzogenen Erwartungen hinsichtlich der Verfügbarkeit konfrontiert werden.
2. Mit zunehmender Produktreife, höheren Stückzahlen und zunehmendem Wettbewerb werden die kostentreibenden Faktoren an Einfluss verlieren.

5.1 Batteriebusse

Basis für die Ermittlung von Kostenreduktionspotenzialen für Batteriebusse stellt eine Unterteilung der Busse in Grundfahrzeug und Komponenten, die batteriebusspezifisch sind, dar. Das Grundfahrzeug sowie die batteriebusspezifischen Komponenten werden mit sog. F&E-Faktoren $f_{F\&E}$ belegt, um anhand der aktuellen Marktpreise K_{2017} die gegenwärtig inkludierten F&E-Kosten $K_{F\&E}$ inkl. Risikoaufschläge abschätzen zu können:

$$K_{F\&E} = K_{2017} \times f_{F\&E} \qquad (5\text{-}1)$$

$f_{F\&E} = 1{,}0$ Forschungsphase, Konzeptentwicklung begonnen
$f_{F\&E} = 0{,}9$ Forschungsphase, Konzeptentwicklung abgeschlossen
$f_{F\&E} = 0{,}8$ Forschungsphase, Prototypenentwicklung begonnen
$f_{F\&E} = 0{,}7$ Forschungsphase, Prototypenentwicklung abgeschlossen
$f_{F\&E} = 0{,}6$ Entwicklungsphase, Hersteller erster Prototyp
$f_{F\&E} = 0{,}5$ Entwicklungsphase, Markterprobung von Prototypen
$f_{F\&E} = 0{,}4$ Entwicklungsphase, Übergang Prototyp zur Serienfertigung
$f_{F\&E} = 0{,}3$ Marktphase, Serienfertigung aufgebaut
$f_{F\&E} = 0{,}2$ Marktphase, Empfehlungen von Anwendern fließen ein
$f_{F\&E} = 0{,}1$ Marktphase, Verbesserungen nur noch geringfügig möglich
$f_{F\&E} = 0{,}0$ Marktphase, Entwicklung abgeschlossen

5.1.1 Grundfahrzeug

Der Basiswert für die Ermittlung der Kosten für das Grundfahrzeug unterstellt Lieferlose von je 10 Stück. Davon abgezogen werden die dieselbusspezifischen Ausrüstungskomponenten (Tabelle 5-1). Unberücksichtigt bleiben die Kosten für spezifische Ausrüstungen der Verkehrsunternehmen, beispielsweise rechnergestützte Betriebsleitsysteme (RBL), Fahrgastinformationssysteme, Verkaufssysteme etc., welche je nach Ausführung zwischen 20 und 50 T€ betragen.

Als zusätzliche Kosten werden umgerechnete F&E-Aufwendungen für die Neukonstruktion der Fahrzeuge inkl. Homologation sowie höhere Risikoaufschläge in Ansatz gebracht.

Komponenten	**Kosten K_{2017} Standardbus**	**Kosten K_{2017} Gelenkbus**	**F&E-Faktor**
Basiswert: Fahrzeugaufbau mit 2 bzw. 3 Türen	200.000 €	300.000 €	-
abzüglich dieselbusspezifische Komponenten: Motor, Anbauteile, Abgasnachbehandlung, Getriebe, Antriebsachse	-45.000 €	-48.500 €	-
abzüglich dieselbusspezifische Zusatzkomponenten: Klimaanlage Fahrer / Zusatzheizung	-19.500 €	-19.500 €	-
zuzüglich Neukonstruktion	85.000 €	105.000 €	0,7
zuzüglich Risikoaufschlag	40.000 €	50.000 €	0,7
Summe kalkulierter Kosten für Grundfahrzeug	250.500 €	377.000 €	

Tabelle 5-1: Grundfahrzeug

5.1.2 Traktionsausrüstung, Leistungselektronik und fahrzeugseitige Ladeinfrastruktur

Komponenten	**Kosten K_{2017} Standardbus**	**Kosten K_{2017} Gelenkbus**	**F&E-Faktor**
Zentralmotor mit Antriebsachse	30.000 €	48.000 €	0,2
Antriebsachse mit radnahem Motor	30.000 €	60.000 €	0,1
Radnabenmotor (Paar) mit Achsgestell	35.000 €	70.000 €	0,3
Bremswiderstand inkl. Chopper	5.000 €	5.000 €	0,1

Tabelle 5-2: Traktionsausrüstung

Die Kosten für die Traktionsausrüstung und die zugehörigen F&E-Faktoren sind in Tabelle 5-2 aufgeführt. Die Kosten aller Komponenten wurden inkl. Montage und Leitungsverlegung ermittelt. Für Gelenkbusse wurden zwei angetriebene Achsen unterstellt.

Die Kosten und die F&E-Faktoren finden sich in Tabelle 5-3, die Werte für die Ausrüstungsteile der Nachladung in Tabelle 5-4. Unterstellt werden Fahrzeuge mit konduktiver Energieübertragung.

Komponenten	**Kosten K_{2017} Standardbus**	**Kosten K_{2017} Gelenkbus**	**F&E-Faktor**
Steuergerät Leistungselektronik inkl. Programmierung	5.000 €	5.000 €	0,5
Traktionsumrichter, je Antriebsachse	6.000 €	10.000 €	0,1
DC/DC Energiespeicher	10.000 €	12.000 €	0,3
DC/DC 24 VDC	7.000 €	8.000 €	0,1
Bordnetzumrichter 400 V AC	7.000 €	8.000 €	0,3
Sonstiges sowie Verkabelung und Montage	4.000 €	5.000 €	0,1

Tabelle 5-3: Leistungselektronik

Komponenten	**Kosten K_{2017} Standardbus**	**Kosten K_{2017} Gelenkbus**	**F&E-Faktor**
Pantograph auf Fahrzeugdach inkl. Anbindung	11.000 €	11.000 €	0,3
Passives Kontaktstück auf Fahrzeugdach inkl. Anbindung	6.000 €	6.000 €	0,3
Ladeanschluss, CCS-Stecker	1.000 €	1.000 €	0,1
Sonstiges sowie Verkabelung und Montage	1.500 €	1.500 €	0,1

Tabelle 5-4: Fahrzeugseitige Ladetechnik

5.1.3 Energiespeicher

Für den Elektrobuseinsatz geeignete Energiespeicher können wie folgt untergliedert werden:

- Hochleistungsbatterien
- Hochenergiebatterien
- Hochleistungskondensatoren (SuperCaps)

Hochleistungskondensatoren verlieren aufgrund fortschreitender Batterietechnologien zunehmend an Bedeutung und werden als Energiespeicher in Fahrzeugen zukünftig keine Rolle mehr spielen.

Hochleistungsbatterien sind dadurch gekennzeichnet, dass sie bei der Nachladung innerhalb verhältnismäßig kurzer Zeit eine vergleichsweise hohe Energiemenge aufnehmen können. Daher sind derartige Batterien besonders für Busse,

die nach dem Nachladeprinzip der Gelegenheitsladung eingesetzt werden sollen, geeignet.

Hochenergiebatterien eignen sich insbesondere für Volllader, die ausschließlich auf dem Betriebshof geladen werden und dadurch eine hohe Energiemenge mitführen müssen. Im Gegensatz zu Hochleistungsbatterien können diese Batterien jedoch nur mit einer geringeren elektrischen Leistung geladen werden. Verglichen mit Hochleistungsbatterien sind Hochenergiebatterien bei gleichem Energieinhalt preislich günstiger.

Die notwendige Kühlung, die Verkabelung und Montage sowie das Batteriemanagementsystem (BMS) sind in den in Tabelle 5-5 aufgelisteten Kosten bereits enthalten.

Komponenten	**Kosten K_{2017} Standardbus**	**F&E-Faktor**
Hochleistungsbatterie	1.000 €/kWh	0,5
Hochenergiebatterie	750 €/kWh	0,5

Tabelle 5-5: Fahrzeugseitige Energiespeicher

5.1.4 Nebenaggregate

Komponenten	**Kosten K_{2017} Standardbus**	**Kosten K_{2017} Gelenkbus**	**F&E-Faktor**
Teilklimatisierung Fahrerarbeitsplatz (elektrisch)	5.000 €	5.000 €	0,3
Vollklimatisierung Fahrerarbeitsplatz (elektrisch)	6.000 €	6.000 €	0,3
Teilklimatisierung Fahrgastraum (elektrisch)	8.000 €	12.000 €	0,3
Vollklimatisierung Fahrgastraum (elektrisch)	8.000 €	16.000 €	0,3
Diesel-Zusatzheizung	3.000 €	3.000 €	0,1
diesel-elektrische Zusatzheizung (Hybrid)	3.500 €	4.500 €	0,3
Vollelektrische Heizung	8.500 €	8.500 €	0,3
Wärmepumpe bidirektional	15.000 €	15.000 €	0,5
Kompressor, Lenkhilfpumpe, Kühlmittelpumpe	35.000 €	40.000 €	0,4
Verkabelung	2.500 €	3.000 €	0,1

Tabelle 5-6: Nebenaggregate

5.1.5 Kostenreduktionspotenzial

Für die Ermittlung der Kostenreduktionspotenziale ist es notwendig, Batteriebusse zu konfigurieren. Hierfür werden die vier in Kapitel 4 definierten Fahrzeugkonfigurationen verwendet.

Die sich daraus ergebenden Ist-Kosten für das Jahr 2017 und deren Unterteilung sind in Tabelle 5-7 aufgelistet.

Kostenpositionen	Standardbus Volllader	Standardbus Gelegenheits-ladung	Gelenkbus Volllader	Gelenkbus Gelegenheits-ladung
Kosten für Grundfahrzeug	250.500 €	250.500 €	377.000 €	377.000 €
Kosten für batteriebus-spezifische Komponenten	131.500 €	142.500 €	169.000 €	180.000 €
Energiespeichertyp	Hochenergie	Hochleistung	Hochenergie	Hochleistung
Energieinhalt nominell	350 kWh	250 kWh	400 kWh	300 kWh
Kosten Energiespeicher	262.500 €	250.000 €	300.000 €	300.000 €
Gesamtkosten	644.500 €	643.000 €	846.000 €	857.000 €

Tabelle 5-7: Ist-Kosten für Batteriebusse

Mit Hilfe von Gleichung (5-1) wurden im nächsten Schritt die F&E-Kosten ermittelt, die beim Übergang auf eine Serienfertigung in großen Stückzahlen zu vernachlässigen sind und somit das Kostenreduktionspotenzial darstellen. Die Ergebnisse sowie die daraus resultierenden Beschaffungskosten sind in Tabelle 5-8 aufgeführt.

Kostenpositionen	Standardbus Volllader	Standardbus Gelegenheits-ladung	Gelenkbus Volllader	Gelenkbus Gelegenheits-ladung
Kostenreduktionspotenzial	245.000 €	242.000 €	294.000 €	297.000 €
Beschaffungskosten	400.000 €	401.000 €	552.000 €	560.000 €

Tabelle 5-8: Kostenreduktionspotenzial und resultierende Beschaffungskosten für Batteriebusse (gerundet)

Vergleicht man die ermittelten Beschaffungskosten mit den Zielkosten aus Kapitel 4, wird deutlich, dass die Zielkosten nur dann erreicht werden, wenn ein Batterietausch während der Nutzungsdauer der Fahrzeuge nicht notwendig wird. Ist ein solcher Tausch während der angesetzten Nutzungszeit der Fahrzeuge bei Volllladern notwendig, überschreiten deren Beschaffungskosten aus Tabelle 5-8 die Zielkosten.

Folgende Randbedingungen sind dabei zu beachten:

1. Die Aussagen treffen nur für die in Kapitel 4 beschriebenen Fahrzeugkonfigurationen zu. Hierbei sei nochmals betont, dass die konfigurierten Busse Energiespeicher mit nominellen Energieinhalten mitführen, die zurzeit noch nicht verbaut werden können.
2. Die Ergebnisse hängen von angesetzten Werten für jährliche Fahrleistungen, spezifische Energieverbräuche und Kosten für Elektroenergie und Diesel ab. Hierbei wurden konservative Annahmen hinsichtlich der Preisentwicklung getroffen.
3. Die Aussagen unterstellen bei Batteriebussen eine mit heutigen Dieselbussen vergleichbare Verfügbarkeit und technische Reife, sodass keine

zusätzlichen Fahrzeugreserven vorgehalten werden müssen und kein zusätzliches Personal eingesetzt werden muss.

5.2 Ladeinfrastruktur

Die Ladeinfrastruktur unterscheidet sich in Ladegeräte für den Einsatz in den Betriebshöfen (Langsamladung) und Ladestationen für die Schnellladung an Endhaltestellen.

Ladegeräte werden derzeit mit spezifischen Kosten zwischen etwa 700 und 1.000 € / kW Ladeleistung angeboten. Unterstellt man über Skaleneffekte eine Kostendegression von 30 %, sind die in Kapitel 4 genannten Zielkosten von etwa 600 € / kW Ladeleistung als realistisch anzusehen. Darin sind anteilige Anschlusskosten nicht enthalten, bei denen von keinen sinkenden Kosten auszugehen ist.

Die Kosten für Ladestationen unterscheiden sich erheblich hinsichtlich der Kosten für deren Lieferung und Aufstellung und die Anschlusskosten. Ladestationen ohne Mittelspannungs-/Niederspannungs-Transformator werden zurzeit mit etwa 750 – 1.000 € / kW Anschlussleistung angeboten. Darin enthalten sind i. d. R. die Aufstellung und die Verkabelung sowie der Lademast inkl. straßenseitigem Kontaktsystem. Unterstellt man wiederum Preisdegressionen von etwa 30 %, sind die in Kapitel 4 genannten Zielkosten von rund 700 € / kW Ladeleistung als realistisch anzusehen. Demgegenüber sind auch zukünftig keine signifikant niedrigeren Anschlusskosten zu erwarten.

5.3 Wirkung bei Nichterreichung der Kostenreduktionsziele

Eine Nichterreichung der Kostenreduktionsziele führt zwangsläufig zu höheren Kosten pro Fahrzeugkilometer und damit zu einer sinkenden Wirtschaftlichkeit im Vergleich mit Dieselbussen. Die Auswirkungen werden in Kapitel 4.8 bei der Definition der Zielkosten in unterschiedlichen Untersuchungsfällen quantifiziert.

Spielen für Verkehrsunternehmen wirtschaftliche Aspekte eine gewichtige Rolle beim Wechsel auf Batteriebusse ist somit davon auszugehen, dass dadurch Umstellungen ohne staatliche Förderung hintenan gestellt werden, sofern keine weiteren Anreize oder Zwangsaspekte (z. B. Umweltvorgaben) bestehen.

6 Empfehlungen für die Förderung von Batteriebussen und deren Ladeinfrastruktur

6.1 Grundsätzliche Überlegungen

Die Ergebnisse der Kapitel 4 und 5 zeigen, dass Batteriebusse kurz- bis mittelfristig nur mit einer finanziellen Unterstützung kostendeckend einsetzbar sind, folgerichtig ein Markthochlauf und somit eine Kostenreduktion über Skaleneffekte vorläufig mittels Förderung unterstützt werden müssen.

Gleichzeitig darf eine Förderung zu keinen Mitnahmeeffekten führen. Sie sollte vielmehr so gestaltet werden, dass sie gleichzeitig dem Markthochlauf dient und zu dringend notwendigen Kostenreduktionen führt.

Die mit der Einführung von Batteriebussen verbundenen Kosten lassen sich grob in die in Tabelle 6-1 aufgeführten Positionen unterteilen. Diese unterscheiden sich insbesondere hinsichtlich der Höhe der notwendigen Anfangsinvestition sowie der Kosten pro Fahrzeugkilometer.

	Anfangs-investition	**Kosten / Fzg-km**	**Unsicherheit**	**Gefahr von Mitnahmeeffekten**
Fahrzeuge ohne Batterie	moderat – hoch	hoch	moderat	sehr hoch
Batterien	sehr hoch	sehr hoch	sehr hoch	hoch
Ersatzbatterien	sehr hoch	sehr hoch	sehr hoch	hoch
Ladegeräte	hoch	moderat	moderat	hoch
Installationskosten	moderat - hoch	gering	gering	gering
Ladestationen	hoch – sehr hoch	moderat	moderat	hoch
Anschlusskosten	hoch	gering	gering	gering
Werkstatt	moderat	gering	gering	gering
Schulungskosten	gering	gering	gering	gering
Baukosten	moderat – hoch	gering	gering	gering

Tabelle 6-1: Bewertung von Kostenpositionen bei der Einführung von Batteriebussen

Eine weitere nicht zu unterschätzende Größe ist die subjektiv empfundene Unsicherheit bei den Verkehrsunternehmen hinsichtlich Planungssicherheit. Dies betrifft insb. die Nutzungsdauer der Batterien und die Kosten für deren Ersatz. Darüber hinaus werden die Kosten für die Errichtung der Ladeinfrastruktur oft überbewertet, wobei deren geringe Auswirkungen auf die Kosten pro Fahrzeugkilomater übersehen werden.

6.2 Förderinstrumentarien

Ausgehend von den Aussagen in Tabelle 6-1 und den Kostenberechnungen in Kapitel 4 werden die nachfolgenden Förderinstrumentarien empfohlen. Diese zielen ab auf:

1. Weitgehend kostenneutraler Betrieb im Vergleich zu Dieselbussen
2. Vermeidung von Mitnahmeeffekten

3. Förderung von Fahrzeugen mit möglichst großen Energiespeichern für eine größtmögliche Flexibilität im Betrieb
4. Anreize für die Entwicklung langlebiger Energiespeicher mit möglichst hoher Ladeleistung
5. Anreize zur Kostenreduktion und zur Steigerung der Zuverlässigkeit über eine zeitlich abschmelzende Förderung
6. Reduzierung der subjektiv als zu hoch empfundenen Investitionskosten für die Ladeinfrastruktur
7. Vermeidung einer überdimensionierten Ladeinfrastruktur

FK1: Fahrzeuge ohne Batterie:

- Bemessungsgrundlage: Kosten für Batteriebus abzgl. Batteriekosten abzgl. Kosten vergleichbarer Dieselbus ohne Fahrzeugförderung
  zeitlich auf null abschmelzende Deckelbeträge:
  - Standardbus Volllader: 220.000 € / Fzg
  - Standardbus Gelegenheitsl.: 240.000 € / Fzg
  - Gelenkbus Volllader: 260.000 € / Fzg
  - Gelenkbus Gelegenheitsl.: 280.000 € / Fzg
- Förderung: 50 % bezogen auf Bemessungsgrundlage
  ggf. zzgl. gleicher Fahrzeuggrundförderung wie Dieselbusse

FK2: Batterien:

- Bemessungsgrundlage: nomineller Energieinhalt
- Förderung: Festbetrag pro kWh nomineller Energieinhalt
  - Volllader: 700 € / kWh
  - Gelegenheitslader: 1.000 € / kWh, wenn maximale Ladeleistung ≥ 250 kW, sonst wie Volllader
  - Zuschlag für Lebensdauergarantie ab dem 7. Jahr: 25 € / kWh / a
  - zeitlich jeweils abschmelzend auf null

Bedingung: FK1 + FK2 ≤ 0,8 x (Kosten Batteriebus – Kosten Dieselbus)

FK3: Ersatzbatterien:

- Bemessungsgrundlage: nomineller Energieinhalt
- Förderung: gegenüber der ersten Batterie verringerter Festbetrag pro kWh nomineller Energieinhalt
  - Volllader: 500 € / kWh
  - Gelegenheitslader: 700 € / kWh
  - bei Fahrzeugkauf garantiert und bewilligt jedoch noch nicht ausgezahlt
  - zeitlich abschmelzend auf null

FK4: Ladegeräte inkl. Kontaktsystem / Stecker und Ladekabel:

- Bemessungsgrundlage: maximale Ladeleistung
- Förderung: Festbetrag pro kW maximaler Ladeleistung
  - bis 50 kW: 400 € / kW

- bis 75 kW: 350 € / kW
- über 75 kW: 300 € / kW
- zeitlich abschmelzend auf null

FK5: Übergeordnete Steuerung der Ladegeräte inkl. Kommunikationseinrichtungen:

- Bemessungsgrundlage: Anzahl Ladegeräte
- Förderung: Festbetrag pro bereits installiertem oder aktuell zu beschaffendem Ladegerät
  - bis 50 Ladegeräte: 500 € / Ladegerät
  - über 50 Ladegeräte: 400 € / Ladegerät
  - zeitlich abschmelzend auf null

FK6: Installationskosten für Ladegeräte im Betriebshof oder in Abstellanlagen inkl. baulicher Maßnahmen und Anschlusskosten:

- Bemessungsgrundlage: tatsächliche Kosten für die Aufstellung und den Anschluss der Ladegeräte, inkl. sämtlicher baulicher Installationen und Anschlusskosten
- Förderung: zinsloser Kredit in voller Höhe der Installations- und Anschlusskosten

FK7: Ladestation inkl. Einhausung, ggf. Transformator, Netzschlussstelle, Lademast, Kontaktsystem und Verbindungskabel:

- Bemessungsgrundlage: maximale Ladeleistung
- Förderung: Festbetrag pro kW maximaler Ladeleistung
  - 600 € / kW ohne Transformator
  - 700 € / kW mit Transformator
  - gedeckelt auf 450 kW maximale Ladeleistung
  - zeitlich abschmelzend auf null

FK8: Anschlusskosten für Ladestationen bis Grenze Netzanschlussstelle der Ladestation:

- Bemessungsgrundlage: tatsächliche Kosten für den Anschluss gedeckelt pro angeschlossener Ladestation auf
  - 100.000 € bei Niederspannungsanschluss
  - 25.000 € bei Mittelspannungsanschluss
- Förderung: zinsloser Kredit in voller Höhe der Anschlusskosten

FK9: Baukosten für Anpassung von Haltestellen oder Wendeschleifen im Zuge der Errichtung von Ladestationen:

- Bemessungsgrundlage: tatsächliche Baukosten
- Förderung: zinsloser Kredit in voller Höhe der Baukosten

FK10: Kosten für die Anpassung der Werkstattausrüstung und Personalschulung:

- Bemessungsgrundlage: Anzahl zu beschaffender Fahrzeuge
- Förderung:
  - 6.500 € / Fahrzeug für bis zu 10 Fahrzeuge
  - 5.500 € / Fahrzeug für bis zu 20 Fahrzeuge
  - 4.500 € / Fahrzeug bei mehr als 20 Fahrzeugen

	jeweils pro Beschaffungsvorgang, Kumulation sollte zulässig sein

Als Zeithorizont für das Abschmelzen der Förderung auf null werden zehn Jahre empfohlen, um die Markteinführung von Batterien der neuen Zellgeneration mit zu unterstützen. Nach sechs Jahren wird eine Überprüfung der Fördersätze empfohlen.

6.3 Begleitende Maßnahmen, ergänzende Anmerkung

Die Berechnungen im Kapitel 4 und darauf aufbauend die Empfehlungen zur Förderung setzen vergleichsweise niedrige Energiebezugskosten voraus (s. Tabelle 4-3). Um dies zu erreichen, ist hinsichtlich Steuern und Abgaben eine Behandlung wie bei der Elektroenergie für Schienenbahnen notwendig.

Die Fahrzeuge sollten unabhängig von der verwendeten Heizungsart gefördert werden. Ergänzende Förderungen für den Einbau von hocheffizienten, rein elektrischen Heizungen sind zielführend für die Weiterentwicklung dieser Technologien.

7 Zusammenfassung

Batteriebusse und deren Ladeinfrastruktur stehen an der Grenze einer breiten Markteinführung. Obwohl die Fahrzeuge sowie die Ladeinfrastruktur den Vor- bzw. Kleinserienstatus noch nicht verlassen haben, handelt es sich bei der Mehrzahl der verbauten Komponenten um seit langem genutzte Technologien. Hiervon ausgenommen sind jedoch Energiespeicher und verschiedene elektrische Nebenaggregate, wie z. B. Luftpresser oder Lenkhilfpumpen.

Die Anforderungen an Batteriebusse spiegeln deren Einsatzbedingungen (auf minimalen Personaleinsatz optimierte Umlaufpläne). Die Analyse von 5.500 Umlaufplänen aus 16 Verkehrsunternehmen führte zu folgenden Ergebnissen:

1. Für Batteriebusse ohne Schnelladeoption mit einer Reichweite unter 200 km existiert nur ein eingeschränkter Markt.
2. Kurz- bis mittelfristig sind Fahrzeuge mit einer Reichweite von 200 – 250 km notwendig, um den Einstieg in eine breitere Batteriebusanwendung auch und vor allem in kleineren und mittleren Verkehrsunternehmen zu ermöglichen.
3. Langfristig sind Reichweiten von 300 – 350 km notwendig, mit denen über 90 % aller Fahrleistungen abdeckbar wären.
4. Die notwendigen Reichweiten bedingen für eine Übergangszeit Brennstoffheizungen in den Batteriebussen.

Werden alternativ Batteriebusse nach dem Prinzip der Gelegenheitsladung an Endhaltestellen nachgeladen, sollten folgende nutzbare Speicherinhalte und Ladeleistungen als mittelfristige Zielgrößen betrachtet werden:

1. Standardbusse: 200 kWh / 250 kW (Brennstoffheizung) bzw. 250 kWh / 300 kW (elektrische Heizung)
2. Gelenkbusse: 200 kWh / 250 kW (Brennstoffheizung) bzw. 250 kWh / 450 kW (elektrische Heizung).

Batteriebusse sind derzeit aufgrund der Investitionskosten im Vergleich mit Dieselbussen nicht konkurrenzfähig. Betrachtungen zu Zielkosten sind extrem von den Annahmen zu Preisentwicklungen bei Diesel und Elektroenergie abhängig. Die Zielkosten für einen im Vergleich zu Dieselbussen kostenneutralen Einsatz von Batteriebussen liegen in etwa bei

- 430.000 – 480.000 € für Standardbusse,
- 580.000 – 650.000 € für Gelenkbusse und
- 700 € / kW Ladeleistung für Ladestationen.

Voraussetzung sind jedoch Energiespeicher, die während der Nutzungsdauer der Fahrzeuge von 14 Jahren nicht ausgetauscht werden müssen.

Unterstellt man übliche Produktentwicklungs- und Marktzyklen wird deutlich, dass die ermittelten Zielkosten erreichbar sind. Hierbei sind jedoch Skaleneffekte und Synergien mit anderen Fahrzeugklassen, insb. im Bereich der Energiespeicher notwendig.

Ein Markthochlauf benötigt jedoch kurz- bis mittelfristig eine sukzessiv zu verringernde Förderung. Eine dauerhafte gesonderte Subventionierung des Batteriebusbetriebs ist jedoch nach Ansicht des Autors nicht zu befürchten.

Anzustreben ist ein auf fünf bis acht Jahre auszurichtendes Förderprogramm, das auch einen Energiespeichertausch finanziell unterstützt. Darüber hinaus sind steuerliche Anreize für die Elektroenergie notwendig.