

**Berlin: mobiler**

## **Nahverkehrsplan Berlin 2019–2023**

Anlage 7 – Migration des Busverkehrs auf  
alternative Antriebe beziehungsweise  
nicht-fossile Antriebsenergien

# Inhalt

<b>Tabellenverzeichnis .....</b>	<b>3</b>
<b>Abbildungverzeichnis.....</b>	<b>4</b>
<b>1 Handlungsbedarf und Handlungsziele zur Umstellung des Dieselmotors auf klimaneutrale Antriebe .....</b>	<b>5</b>
1.1 Handlungsbedarf: Absenkung der verkehrsspezifischen Treibhausgasemissionen.....	5
1.2 Handlungsziel: Schrittweise Umstellung des Busbetriebes auf alternative Antriebe beziehungsweise nicht fossile Antriebsenergien bis 2030 .....	7
<b>2 Charakteristika, Fahrzeugeinsatzbedingungen und Fahrzeugbestand im Berliner Busverkehr.....</b>	<b>10</b>
2.1 Fahrzeugbestand und Perspektiven der Fahrzeugbeschaffung.....	10
2.2 Charakteristika und Einsatzbereiche Berliner Bustypen.....	12
2.3 Zwischenfazit.....	17
<b>3 Stand alternativer Antriebstechnik im Jahr 2018.....</b>	<b>18</b>
3.1 Antriebsenergien und Ladetechniken im Busbereich .....	18
3.2 Praktische Einsatzbarkeit verschiedener E-Bus-Alternativen .....	22
3.3 Wirtschaftlichkeit elektrischer Bussysteme .....	27
3.4 Infrastrukturanforderungen des Elektrobusses .....	29
3.5 Entwicklung der Batterietechnik .....	33
<b>4 Migrationspfad zum dekarbonisierten Busverkehr bis 2030 .....</b>	<b>37</b>
4.1 Kriterien zum Systementscheid für die Umstellung des Busverkehrs bis 2030 ....	37
4.2 Einstieg in den Umstellungsprozess .....	38
<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>42</b>
<b>Impressum .....</b>	<b>43</b>

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Aufteilung der im Berliner Busverkehr eingesetzten Fahrzeuge.....	10
Tabelle 2:	Charakteristika des 7-m-Kleinbusses und des 9-m-Midibusses.....	12
Tabelle 3:	Charakteristika des 12-m-Standardlinienbusses .....	13
Tabelle 4:	Charakteristika des 18-m-Gelenkbusses.....	14
Tabelle 5:	Charakteristika des Doppeldeckers (dreiachsig) .....	15
Tabelle 6:	Charakteristika von Großraumbussen .....	16
Tabelle 7:	Primärenergieeffizienz von verfügbaren alternativen Antrieben beziehungsweise nicht-fossilen Antriebsenergien.....	18
Tabelle 8:	Ladekonzepte für den Betrieb von Elektrobussen.....	22
Tabelle 9:	Fahrzeughersteller für elektrische Busse.....	27
Tabelle 10:	Entwicklungsperspektive der Reichweiten reiner Batteriebusse mit Depotladung.....	36

## Abbildungverzeichnis

Abbildung 1:	Entwicklung der verkehrsspezifischen Treibhausgasemissionen in Deutschland.....	5
Abbildung 2:	CO <sub>2</sub> -Emissionen des motorisierten Individualverkehrs in Berlin im Vergleich zu anderen Verkehrsmitteln (Stand 2016) .....	7
Abbildung 3:	Umweltwirkung der Umstellung von Busleistungen auf die Straßenbahn bis 2035 .....	8
Abbildung 4:	Auswirkung des Fahrzeugmehrbedarfs auf die Mehrkosten des E-Bus-Betriebs.....	28
Abbildung 5:	Potenzielle Ausnutzung von Ladeinfrastruktur durch Überlagerungen von Linien .....	32
Abbildung 6:	Migrationspfad alternative Antriebe in der Laufzeit des Nahverkehrsplans.....	40

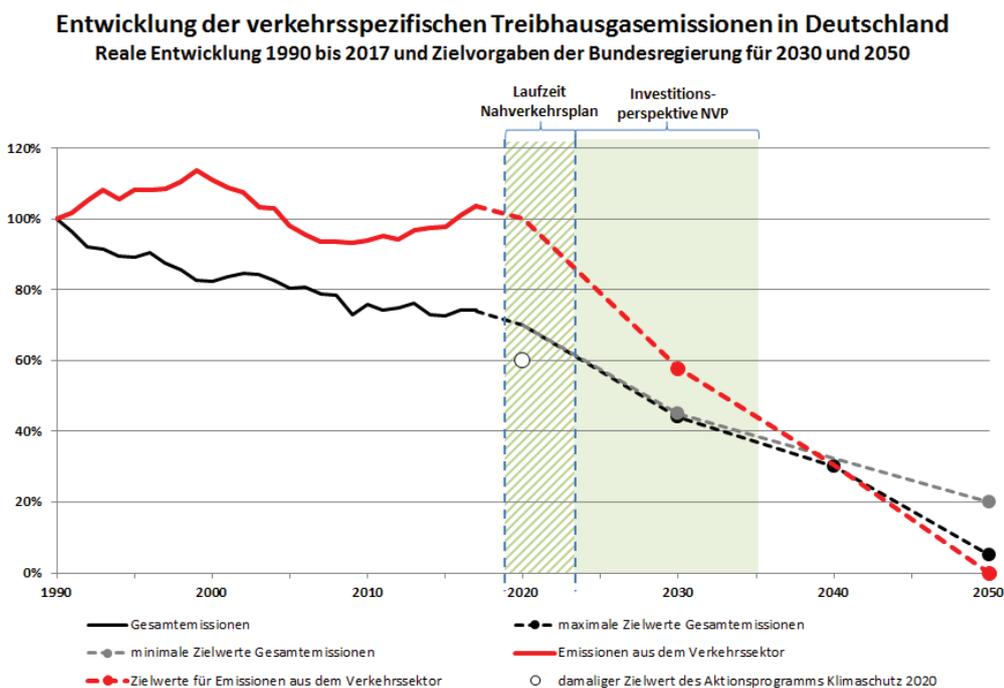
# 1 Handlungsbedarf und Handlungsziele zur Umstellung des Dieselmotors auf klimaneutrale Antriebe

Gemäß § 8 Abs. 1 MobG sollen verkehrsbedingte Beeinträchtigungen von Klima und Umwelt durch Verlagerung von Nachfrage auf die Verkehrsmittel des Umweltverbundes sowie durch den Einsatz umweltfreundlicher Technologien so reduziert werden, dass die verkehrsspezifischen Umweltziele sowie die Klimaschutzziele des Landes Berlin zur Umsetzung des Übereinkommens von Paris vom 12. Dezember 2015 erreicht werden.

## 1.1 Handlungsbedarf: Absenkung der verkehrsspezifischen Treibhausgasemissionen

Anders als in anderen volkswirtschaftlich erfassten Sektoren ist es im Bereich des Verkehrs bis 2016 nicht gelungen die spezifischen Treibhausgasemissionen im Verhältnis zu den Ausgangswerten des Jahres 1990 zu reduzieren. Seit 2008 wird der Trend zudem von einem Wachstum der Treibhausgasemissionen bestimmt.

Abbildung 1: Entwicklung der verkehrsspezifischen Treibhausgasemissionen in Deutschland



Erforderlich ist ein schnelleres Umsteuern, wie es der Sachverständigenrat für Umweltfragen für Deutschland im November 2017 in einem Sondergutachten beschreibt:

- Um bis 2050 eine klimaneutrale Antriebstechnik zu erreichen muss der technologische Wandel bei den Antriebstechnologien bis Mitte der 2030er-Jahre vollzogen sein.<sup>1</sup>
- In einem nachhaltigen Mobilitätssystem darf auch ein elektrifizierter motorisierter Individualverkehr nicht weiter wachsen. Soll die nachhaltige Dekarbonisierung des Verkehrs gelingen, muss sowohl die Anzahl der Fahrzeuge als auch die Zahl der von ihnen zurückgelegten Kilometer sinken.<sup>2</sup>

Entsprechend formuliert das Berliner Energie- und Klimaschutzprogramm (BEK 2030):<sup>3</sup>

- Ziel ist es, eine Verlagerung vom (privaten) Pkw hin zu den Verkehrsmitteln des Umweltverbundes auch mithilfe einer entsprechenden Flächenumverteilung zu erreichen. Als Zielwerte sind hierbei ein MIV-Anteil von 22,5 Prozent für das Jahr 2030 und langfristig 17 Prozent für das Jahr 2050 (–13 Prozentpunkte gegenüber 2013).

Vor dem Hintergrund der Diskussion über die Gesundheits- und Umweltbelastung, die insbesondere von Stickoxiden, Feinstaub und Verkehrslärm ausgeht, ist es umso wichtiger, dass der ÖPNV als Teil der Lösung und keinesfalls als Teil des Problems wahrgenommen wird. Besonderes Gewicht kommt daher den umwelt- und klimapolitischen Vorgaben aus § 8 Abs. 1 sowie § 26 Abs. 9 und Abs. 10 MobG zu:

- Verkehrsbedingte Beeinträchtigungen von Klima und Umwelt sollen durch Verlagerung von Nachfrage auf die Verkehrsmittel des Umweltverbundes sowie durch den Einsatz umweltfreundlicher Technologien so reduziert werden, dass die verkehrsspezifischen Umweltziele sowie die Klimaschutzziele des Landes Berlin zur Umsetzung des Übereinkommens von Paris vom 12. Dezember 2015 erreicht werden.
- In Umsetzung der Vorgaben von § 8 sowie zur Vermeidung von Gesundheitsbeeinträchtigungen durch Luftschadstoffe und Lärm soll gemäß § 26 Abs. 9 und 10 die Leistungserbringung im ÖPNV auf Schiene und Straße über geeignete Anforderungen und Maßnahmen bei Planung und Bau von Infrastruktur sowie Beschaffung und Ausgestaltung von Fahrzeugen schrittweise bis spätestens 2030 auf einen vollständigen Betrieb mit alternativen Antrieben sowie nicht-fossilen Antriebsenergien umgestellt werden.
- In diesem Umstellungsprozess sind unter anderem Anforderungen der Energieeffizienz und die Schaffung entsprechender Rahmenbedingungen zu berücksichtigen. Zudem soll die Erprobung neuer, dem Stand der Wissenschaft entsprechender Techniken auf ihre Einsatzreife Teil des Prozesses sein.

Um einen konsequenten Beitrag zum Klimaschutz zu leisten, darf nur Energie aus erneuerbaren Quellen für die Busantriebe verwendet werden. Insbesondere für elektrisch betriebene Fahrzeuge soll entsprechend Leistungsblatt 3.1 der VwVBU zu 100 Prozent Strom aus erneuerbaren Energien (Ökostrom) verwendet werden, der zu 50 Prozent aus Neuanlagen stammt. Dabei soll ein relevanter und sukzessiv steigender Anteil dieser Neuanlagen keine Förderung nach dem Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG) beziehen.

1 Sondergutachten des SRU zu Klimaschutz im Verkehrssektor; November 2017, Randziffer 167.

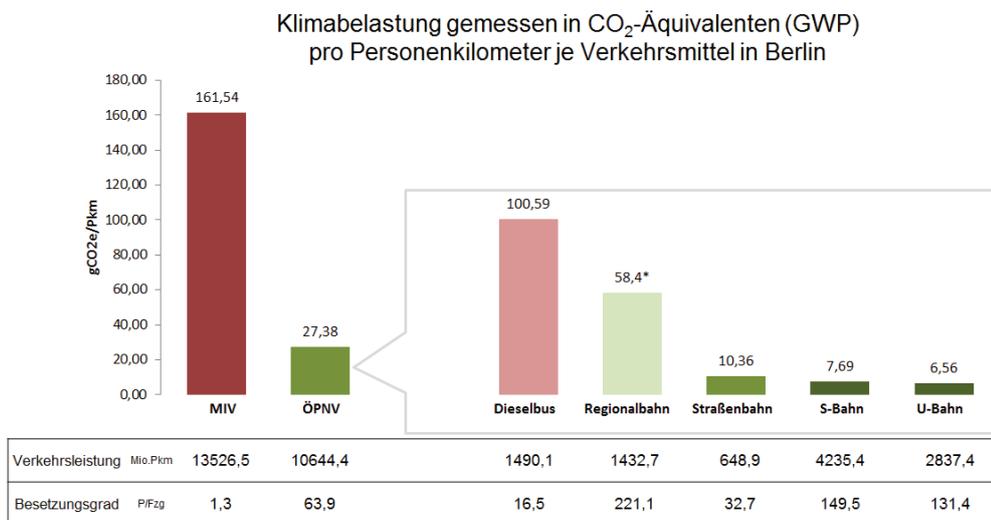
2 Sondergutachten des SRU zu Klimaschutz im Verkehrssektor; November 2017, Randziffer 168.

3 Konsolidierte Fassung auf Basis des Beschlusses des Berliner Abgeordnetenhauses vom 25. Januar 2018.

## 1.2 Handlungsziel: Schrittweise Umstellung des Busbetriebes auf alternative Antriebe beziehungsweise nicht fossile Antriebsenergien bis 2030

Der Busverkehr in Berlin besteht fast ausschließlich aus Fahrzeugen mit Verbrennungsmotoren, die Diesel als Kraftstoff verwenden und daher zu den lokalen Emissionen im Stadtgebiet beitragen (Luftschadstoffe, Lärm, etc.). Im Vergleich zu elektrisch angetriebenen Straßenbahnen, U-Bahnen und S-Bahnen weisen Dieselbusse deutlich niedrigere Kennzahlen für die Klima- und Energieeffizienz pro Personenkilometer auf (vergleiche Abbildung 2).

**Abbildung 2: CO<sub>2</sub>-Emissionen des motorisierten Individualverkehrs in Berlin im Vergleich zu anderen Verkehrsmitteln (Stand 2016)**



Quelle: CNB aus Daten von: UBA, BMVI, SenUVK, VBB, BVG, S-Bahn-Berlin, und DB AG  
Für die elektrisch angetriebenen Fahrzeuge der S-Bahn Berlin und der BVG wird in der Berechnung die Verwendung von Ökostrom als Antriebsenergie berücksichtigt (Anteil von Neuanlagen nicht berücksichtigt).  
Verkehrsleistung/Besetzungsgrad: VBB-Erhebung 2016 (für den ÖPNV in Berlin), Senatsverwaltung für Umwelt, Verkehr und Klimaschutz, Luftreinhalteplan 2011 bis 2017 für Berlin, 2013 und SAV 2016 (für den MIV in Berlin)  
\*Für die Regionalbahn wurde der von der Deutschen Bahn angegebene Wert für den bundesweiten Schienenpersonennahverkehr als Grundlage verwendet.

Entsprechend gilt die gemäß Mobilitätsgesetz geforderte Umstellung auf nicht-fossile Antriebsenergien bis 2030 zum Ausbau der Klimaschutz und der Energieeffizienz im ÖPNV als wesentliches Handlungsziel des Nahverkehrsplans (NVP) 2019–2023 (vergleiche Kapitel 1.3., Ziel 3):

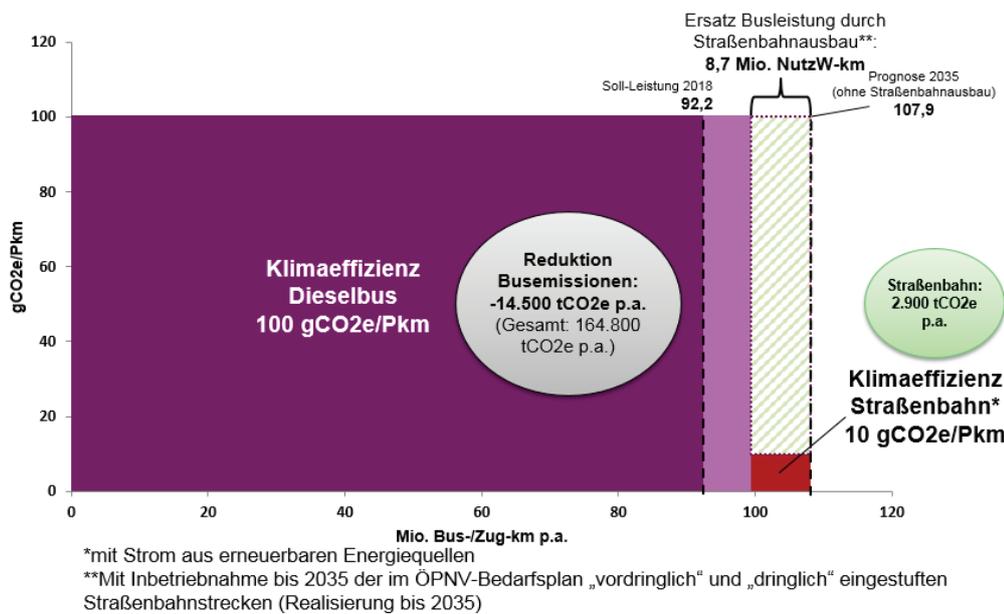
- Dies wird beim Busverkehr einerseits durch die Umstellung hoch frequentierter Buslinien auf elektrisch betriebene, schienengebundene Verkehrsmittel (Straßenbahn und U-Bahn) erfolgen (vergleiche Kapitel 1.2.1).
- Da lediglich ein Teil des Busverkehrs durch Straßenbahn und U-Bahn ersetzt werden wird, liegt andererseits eine wesentliche Stoßrichtung von Maßnahmen zur Verbesserung von Klimaschutz und Gesundheit in der Umstellung des Dieselbusverkehrs auf alternative Antriebe beziehungsweise nicht fossile Antriebsenergien (vergleiche Kapitel 1.2.2).

### 1.2.1 Umstellung von Busleistungen auf Straßenbahn

Gemäß MobG § 26 Abs. 9 ist der Systemwechsel von Bus auf Schienenverkehrsmittel Teil der Migrationsstrategie auf einen ÖPNV-Betrieb mit nicht-fossilen Antriebsenergien. Eine mit Ökostrom (vergleiche Kapitel III.6.2.1 des Nahverkehrsplans) betriebene Straßenbahn stellt insbesondere dann eine Alternative zur Dekarbonisierung des Busverkehrs dar, wenn damit auch eine Entlastung von hochfrequentierten Buslinien ermöglicht wird.

Bahnsysteme weisen im Vergleich zu Dieselbussen spezifische Umweltvorteile auf. Durch die hohen Wirkungsgrade von Elektromotoren, den deutlich geringeren Rollwiderstand zwischen Rad und Schiene und die größere Fahrgastkapazität haben Straßenbahnen eine deutlich bessere Klima- und Energieeffizienz. So emittiert die Straßenbahn im Berliner ÖPNV durchschnittlich lediglich 10 Gramm CO<sub>2</sub>-Äquivalente<sup>4</sup> pro Personenkilometer (gCO<sub>2</sub>e/Pkm) und ist damit um den Faktor 10 effizienter als der Dieselbus, der gut 100 gCO<sub>2</sub>e/Pkm produziert. Ebenfalls verringert sich der Primärenergiebedarf pro Personenkilometer bei Umstellung von Dieselbus auf Straßenbahn um etwa 60 Prozent von 0,41 auf 0,16 Kilowattstunde pro Personenkilometer.

Abbildung 3: Umweltwirkung der Umstellung von Busleistungen auf die Straßenbahn bis 2035



Mit der Umsetzung der bis 2035 nach bisheriger Planung vorgesehenen Straßenbahn-Neubautrecken können so etwa 8,7 Millionen Buskilometer auf nicht-fossile Antriebsenergien umgestellt werden. Dies entspricht der Fahrleistung von ungefähr 140 Bussen. Entsprechend können Emissionen in Höhe von etwa 11.600 Tonnen CO<sub>2</sub>-Äquivalenten vermieden werden (vergleiche Abbildung 3).

Die Umstellung weiterer Buslinien auf Straßenbahn vor 2035 ist aus planerischen, organisatorischen und betrieblichen Gründen nicht umsetzbar. Für eine konsequente Verringerung der Emissionen und eine Steigerung der Energieeffizienz im ÖPNV ist daher eine Umstellung auf Busse mit alternativen Antrieben notwendig.

4 Neben den Emissionen von CO<sub>2</sub> werden auch die Auswirkungen von anderen Treibhausgasen (CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O) miteinbezogen, angenommen wird die Verwendung von 100 Prozent Ökostrom.

### 1.2.2 Umstellung der Busflotte bis 2030 auf nicht-fossile Antriebsenergien

Für die Umstellung des bis 2030 nicht durch den Schienenverkehrsausbau ersetzten Busverkehrs auf nicht fossile Antriebsenergien müssen alternative Antriebskonzepte eingesetzt werden. Dabei sind die spezifischen Anforderungen bei dem Betrieb der Fahrzeuge im Berliner Busverkehr zu berücksichtigen. In Kapitel 2 werden die Charakteristika der umzustellenden Busflotte beschrieben und in Kapitel 3 werden die verfügbaren alternativen Antriebstechniken zu dem konventionellen Dieselantrieb geprüft.

Für die Konzeptionierung der Umstellung des Dieselmotors auf klimaneutrale Antriebe ergeben sich verschiedene Struktur- und Zielvorgaben aus dem Mobilitätsgesetz:

1. **Handlungsziele der Umstellung:** Die Umsetzungsschritte sind gemäß § 26 Abs. 9 MobG an folgenden Handlungszielen auszurichten:
  - a. Verringerung der verkehrstechnischen Beeinträchtigungen von Klima und Umwelt
  - b. Vermeidung von Gesundheitsbeeinträchtigungen (Luftschadstoffe und Lärm)
  - c. Berücksichtigung der Anforderungen der Energieeffizienz
2. **Zeitpunkte der Umstellung:** Die Umstellung soll gemäß § 26 Abs. 9 MobG schrittweise, spätestens bis 2030 erfolgen.
3. **Erprobung als Teil der Umstellung:** Die Erprobung neuer, dem Stand der Wissenschaft entsprechender Techniken auf ihre Einsatzreife soll gemäß § 26 Abs. 10 MobG Teil dieses Umstellungsprozesses sein.

Im Anschluss müssen eine oder mehrere Zieltechnologien festgelegt werden, die eine substantielle und kontinuierliche Entwicklung des Flottenanteils von Fahrzeugen mit alternativen Antrieben in Berlin ermöglichen und die Anforderungen des Mobilitätsgesetzes hinsichtlich Klimaschutz und Gesundheit sowie des Zeithorizonts erfüllen. In der Laufzeit des NVP sind davon folgende relevante Schritte zur Umstellung auf nicht fossile Antriebsenergien im Busbereich zu erreichen (vergleiche NVP 2019–2023, Kapitel I.3 und dort Ziel 3):

- im elektrisch betriebenen ÖPNV (Schienen- und Busverkehr): Verwendung von Ökostrom mit einem möglichst hohen Anteil aus Neuanlagen einschließlich eines relevanten Anteils nicht geförderter Neuanlagen;
- Erprobung möglicher Zieltechnologien und Entwicklung eines Migrationspfads zur Dekarbonisierung (vergleiche Kapitel 4);
- Festlegung der Zieltechnologien bei Entscheidungsreife; dabei Lösung der Herausforderungen hinsichtlich Energiespeicherbedarf von langlaufenden Linien mit hohen täglichen Laufleistungen sowie der bislang nicht gegebenen Verfügbarkeit von Doppeldeckern mit alternativen Antrieben (vergleiche Kapitel 4.2).

## 2 Charakteristika, Fahrzeugeinsatzbedingungen und Fahrzeugbestand im Berliner Busverkehr

### 2.1 Fahrzeugbestand und Perspektiven der Fahrzeugbeschaffung

#### 2.1.1 Ausgangsbestand der Fahrzeugflotte im Jahr 2018

Im ÖPNV-Linienverkehr in Berlin sind derzeit circa 1.500 Fahrzeuge (inklusive etwa 110 Fahrzeuge von Subunternehmern) im Einsatz. Im Bestand der BVG (Stand: 31. Dezember 2017) befinden sich 415 Standardbusse mit 12 Metern Länge (EN), 560 Gelenkbusse mit 18 Metern Länge (GN) und 415 dreiachsige Doppeldecker mit 13,7 Metern Länge (DL). Die Busflotte der BVG besteht fast vollständig aus dieselbetriebenen Fahrzeugen. Davon sind bislang fünf Standardbusse mit elektrischem Antrieb im Bestand.

Die nachstehende Tabelle zeigt, wie sich dieser Fahrzeugbestand derzeit und mit Blick auf das Jahr 2030 auf die drei maßgeblichen Bustypen (Standardbus, Gelenkbus und Doppeldecker) aufteilt. Zudem wird dargestellt, wie sich diese auf die zu bewältigenden Reichweiten aufteilen.

**Tabelle 1: Aufteilung der im Berliner Busverkehr eingesetzten Fahrzeuge**

Laufleistung	12-m-Standardbus (EN) aktueller Bestand: 515* (Planung 2030: 430*)	18-m-Gelenkbus (GN) aktueller Bestand: 560 (Planung 2030: 790)	Doppeldecker (DL) aktueller Bestand: 415 (Planung 2030: 411)
> 300 km	ca. 17 %	ca. 24 %	ca. 17 %
150 bis 300 km	ca. 45 %	ca. 58 %	ca. 73 %
< 150 km	ca. 38 %	ca. 18 %	ca. 10 %
* Busse von Subunternehmen miteinbezogen Die prozentualen Werte entsprechen der Aufteilung der Umläufe der BVG nach Länge in der Frühspitze (Schulitag).			

Um die steigende Nachfrage in der wachsenden Stadt bewältigen zu können, werden zukünftig mehr leistungsfähige Gelenkbusse zulasten von Standardbussen beschafft. Der Bestand an Doppeldeckern bleibt weitgehend unverändert, da ein Aufwuchs von Doppeldeckerleistungen aufgrund infrastruktureller Restriktionen nur bedingt möglich wäre (vergleiche Kapitel 2.2.4) und ein Teil der heutigen Leistungen durch neue Straßenbahnstrecken ersetzt werden wird (vergleiche Kapitel 2.1.3).

#### 2.1.2 Aktuelle Rahmenbedingungen der Beschaffung von Dieselfahrzeugen

In Anbetracht des nicht ausreichenden Reifegrades alternativer Antriebstechniken wird in der Laufzeit des Nahverkehrsplans die Beschaffung weiterer Dieselfahrzeuge weiterhin erforderlich sein. Diese dienen der Erneuerung altersbedingt abgängiger Fahrzeuge und dem Flottenaufwuchs zur Erbringung der im NVP geplanten Leistungsmehrungen. Gemäß Kapitel III.6.2.2. des Nahverkehrsplans müssen die neuen Fahrzeuge unter anderem den aktuellen Richtlinien zur Einhaltung der Grenzwerte für den Ausstoß von Luftschadstoffen erfüllen.

Standard- und Gelenkbusse werden entsprechend der von der BVG kalkulierten Nutzungszeiträume jedes Jahr ausgemustert und durch neue Fahrzeuge ersetzt. Die BVG hat hierzu einen Rahmenvertrag mit dem Fahrzeughersteller EvoBus über die mögliche Beschaffung von bis zu 350 Standardbussen und 600 Gelenkbussen abgeschlossen. Dabei bestehen jedoch keine Abnahmeverpflichtungen. Sofern hinreichend leistungsfähige Busse mit alternativen Antrieben verfügbar sind, kann die BVG die Beschaffung von Dieselnissen flexibel anpassen oder sogar aussetzen.

Beim Doppeldecker ist eine Ausmusterung der kompletten Flotte (415 Fahrzeuge) im Zeitraum 2024 bis 2027 notwendig. Die BVG hat hier ebenfalls einen Rahmenvertrag zur Lieferung entsprechender Dieselfahrzeuge mit dem Hersteller Alexander Dennis geschlossen. Vorbehaltlich erfolgreicher Testeinsätze mit zwei Vorserienfahrzeugen (ab 2020) ist die BVG zur Abnahme von 70 Doppeldeckern verpflichtet. Diese Abnahmeverpflichtung wurde notwendig, da diese Fahrzeuge eigens für Berlin entwickelt und angefertigt werden. Die Fortführung der Beschaffung ist abhängig davon, inwieweit für Doppeldecker in den kommenden Jahren ein Systemwechsel auf nicht fossile Antriebsenergien realisiert werden kann. Wie bei Standard- und Gelenkbussen ist gewährleistet, dass die Beschaffung von Dieselfahrzeugen endet, sobald den Berliner Anforderungen gerecht werdende Fahrzeuge mit nicht fossilen Antriebsenergien verfügbar sind.

Für Dieselfahrzeuge, die das Ende ihrer Nutzungsdauer im Jahr 2030 noch nicht erreicht haben, ist ein Weiterverkauf an andere Verkehrsunternehmen möglich. Inwieweit dann noch nennenswerte Nachfrage nach gebrauchten dieselgetriebenen Fahrzeugen besteht, ist jedoch hinsichtlich der aktuellen Entwicklungen im Bereich Energie und Verkehr unsicher.

### **2.1.3 Fahrzeugbedarf im Jahr 2030 auf Basis der Maßnahmen im NVP 2019–2023 und der vorgesehenen Maßnahmen im ÖPNV-Bedarfsplan**

Der Fahrzeugbedarf hängt von der Entwicklung des Busleistungsvolumens ab. Der Nahverkehrsplan 2019–2023 sieht vor, dass die jährliche Busleistung bis 2030 um circa 7,9 Millionen Buskilometer pro Jahr erhöht wird. Diese Mehrleistungen ergeben sich aus gegenläufigen Effekten. Einerseits werden ungefähr 3,0 Millionen Buskilometer pro Jahr durch die Verlängerung der U5 zum Hauptbahnhof und den Ausbau des Straßenbahnnetzes bis 2030 substituiert. Andererseits wird infolge des Nachfragewachstums eine deutliche Ausweitung des Angebots auf dem restlichen Busnetz erforderlich sein. Neue Metro- und Expressbuslinien sollen eingeführt und die Takte auf zahlreichen Linien verdichtet werden. Die entsprechende Leistungsmehrung bis 2030 beträgt schätzungsweise 10,9 Millionen Buskilometer.

Aus diesem Leistungsaufwuchs resultiert eine Erhöhung des Fahrzeugbedarfs um mindestens 130 Busse. Inklusive Subunternehmern wird der Fahrzeugbedarf bis 2030 damit auf gut 1.630 Fahrzeuge steigen. Hinzu ist ein eventueller Fahrzeugmehrbedarf wegen der Umstellung auf eine alternative Technologie zu berücksichtigen (vergleiche Kapitel 3.2.1 und 3.2.2).

Neben den bereits vorhandenen Bustypen ist perspektivisch auch der Einsatz von Großraumbussen auf hochbelasteten Buslinien, die mittelfristig nicht für die Umstellung auf Straßenbahnbetrieb vorgesehen sind, denkbar (vergleiche Kapitel 2.2.5). Der Anteil von Großraumbussen ist in den weiteren Rechnungen noch nicht berücksichtigt. Dieser würde voraussichtlich überwiegend zu Lasten des Gelenkbusanteils gehen.

## 2.2 Charakteristika und Einsatzbereiche Berliner Bustypen

### 2.2.1 Charakteristika und Einsatzbereich Kleinbus und Midibus

Kleinbusse bilden eine Nische im Berliner Busverkehr ab. Aufgrund der geringen Kapazität von circa 22 Plätzen sind Kleinbusse fast ausnahmslos im Nachtverkehr auf Linien in der Peripherie im Einsatz, die eine unterdurchschnittliche Nachfrage aufweisen. In Ausnahmefällen werden diese Fahrzeuge auch im Tagesverkehr beispielsweise auf Rufbuslinien eingesetzt.

Midibusse mit einer Länge von 9 Meter weisen eine Kapazität von 49 Fahrgästen und werden vor allem auf kurze Erschließungslinien mit sehr geringer Nachfrage eingesetzt.

Der Bestand an Kleinbussen und Midibussen wird derzeit vollständig durch Subunternehmer der BVG gestellt.

**Tabelle 2: Charakteristika des 7-m-Kleinbusses und des 9-m-Midibusses**

	Kleinbus	Midibus
		
<b>Gesamtkapazität</b>	<b>21</b>	<b>49</b>
davon Sitzplätze	12	25
davon Stehplätze	9	24
Investitionskosten im Verhältnis zum Standardlinienbus	0,55	0,9
Energieverbrauch im Verhältnis zum Standardlinienbus	0,4	0,8

### 2.2.2 Charakteristika und Einsatzbereich Standardlinienbus

Standardlinienbusse mit einer Länge von 12 Metern werden insbesondere auf Erschließungslinien mit geringer Nachfrage eingesetzt. In der Hauptverkehrszeit kommen sie auch als Verstärker für nachfragestarke Linienabschnitte zum Einsatz.

Aufgrund ihrer kompakten Maße sind sie grundsätzlich frei im gesamten Berliner Busnetz einsetzbar. In bestimmten Fällen verkehren sie daher auch auf Linien im dichten Takt, die aufgrund infrastruktureller Restriktionen weder mit Gelenk- noch mit Doppeldeckerbussen bedient werden können (vergleiche Kapitel 2.2.3 und 2.2.4).

**Tabelle 3: Charakteristika des 12-m-Standardlinienbusses**

		Standardlinienbus
		
<b>Gesamtkapazität</b>		<b>68</b>
davon Sitzplätze		32
davon Stehplätze		36
Investitionskosten im Verhältnis zum Standardlinienbus		1,0
Energieverbrauch im Verhältnis zum Standardlinienbus		1,0
Jahresbetriebskosten im Verhältnis zum Standardlinienbus		1,0

### 2.2.3 Charakteristika und Einsatzbereich Gelenkbus

Gelenkbusse weisen mit fast 100 Plätzen pro Fahrzeug eine hohe Kapazität auf. Damit eignen sie sich vor allem für laststarke Linien mit hoher Fahrgastnachfrage. Im Vergleich zu den übrigen Busmodellen weist dieser Fahrzeugtyp einen überdurchschnittlichen Stehplatzanteil auf. Dieser ist insbesondere auf Linien mit kurzen Reiseweiten und häufigen Fahrgastwechseln relevant. Gerade Fahrgäste mit kurzen Reiseweiten bleiben oftmals lieber stehen, als sich einen Sitzplatz zu suchen.

Aufgrund dieser Merkmale eignet sich dieser Fahrzeugtyp auch für Schienenersatzverkehrsleistungen und wird für diese regelmäßig herangezogen.

Es ist jedoch zu beachten, dass diese Fahrzeuge in Anbetracht ihrer Länge von 18 Metern auf bestimmten Linien nicht eingesetzt werden können. Nicht ausreichende Nutzlängen an Haltestellen und Schleppkurven bei Abbiegevorgängen können ein Ausschlusskriterium für den Einsatz von Gelenkbussen sein, ebenso auch die unzureichende Tragfähigkeit von Brücken.

**Tabelle 4: Charakteristika des 18-m-Gelenkbusses**

		Gelenkbus
<b>Gesamtkapazität</b>		<b>99</b>
davon Sitzplätze		47
davon Stehplätze		52
Investitionskosten im Verhältnis zum Standardlinienbus		1,4
Energieverbrauch im Verhältnis zum Standardlinienbus		1,25
Jahresbetriebskosten im Verhältnis zum Standardlinienbus		1,15



### 2.2.4 Charakteristika und Einsatzbereich Doppeldecker

Doppeldecker weisen die größte Kapazität der derzeit in Berlin eingesetzten Busse auf. Sie sind daher gerade für laststarke Linien im Metrobusnetz prädestiniert. Es ist allerdings zu beachten, dass die Vorteile des Doppeldeckers von der Liniencharakteristik abhängig sind. Während sich Doppeldecker in Anbetracht ihres großen Anteils von Sitzplätzen im Oberdeck insbesondere für Linien mit langen Reiseweiten eignen, hat sich in der Praxis gezeigt, dass Fahrgäste bei kurzen Reiseweiten eher den Weg ins Oberdeck meiden. Auf entsprechenden Linien ist eine eher unterdurchschnittliche Auslastung des Oberdeckes festzustellen.

Mit einer Länge von 13,7 Metern ist der Doppeldecker im Vergleich zu Gelenkbussen deutlich kürzer. Damit eignet sich dieser Fahrzeugtyp auch für nachfragestarke Linien, die aufgrund infrastruktureller Restriktionen nicht von Gelenkbussen bedient werden können.

Jedoch kann auch der Doppeldecker aufgrund von infrastrukturellen Restriktionen nicht auf allen Linien eingesetzt werden. Linien mit Tunneln und Unterführungen, die keine ausreichenden Durchfahrtshöhen aufweisen, können von Doppeldeckerbussen nicht bedient werden, ebenso nicht Brücken mit unzureichender Tragfähigkeit. Bei Abbiegevorgängen müssen auch spezifische Schlepplkurven berücksichtigt werden.

Der Doppeldecker hat sich darüber hinaus in den letzten 100 Jahren zu einem Wahrzeichen Berlins entwickelt. Sein Einsatz ist daher auch auf Linien mit hoher touristischer Nachfrage geboten und wirkt sich dort positiv auf die Nachfrage aus.

**Tabelle 5: Charakteristika des Doppeldeckers (dreiaxsig)**

		Doppeldecker
<b>Gesamtkapazität</b>		<b>113</b>
davon Sitzplätze		83
davon Stehplätze		30
Investitionskosten im Verhältnis zum Standardlinienbus		1,6
Energieverbrauch im Verhältnis zum Standardlinienbus		1,25
Jahresbetriebskosten im Verhältnis zum Standardlinienbus		1,20



### 2.2.5 Charakteristika und Einsatzbereich von Großraumbussen

Wichtige Buslinien erreichen trotz dichter Takte und dem Einsatz von Gelenk- und Doppeldeckerbussen ihre Kapazitätsgrenzen (zum Beispiel M32, M41 oder M48/M85).

Der Aufgabenträger kann auf stark ausgelasteten Buslinien derzeit nur mit weiteren Taktverdichtungen beziehungsweise -ausweitungen reagieren. Praxiserfahrungen zeigen jedoch, dass im Busverkehr in Berlin lediglich bis zu einer minimalen Taktfolge von circa 4 Minuten auf einer Linie ein zuverlässiger Betriebsablauf möglich ist. Unterhalb dieser Grenze führen bereits kleine Störungen zu Einschränkungen und Pulkbildungen, sodass das Angebot unregelmäßig wird und einige Busse stark überfüllt sind, während andere Busse mit geringer Auslastung verkehren. Nachfragegerechte Verbesserungen im System Bus machen daher den Einsatz von Fahrzeugen mit erweiterter Kapazität erforderlich.

Gegenüber den in Berlin bisher eingesetzten Fahrzeugen bieten hier insbesondere Großraumbusse eine sinnvolle Alternative. Derartige Fahrzeuge werden in zahlreichen Städten in Deutschland und Europa erfolgreich eingesetzt (zum Beispiel Doppelgelenkbusse in Zürich oder Buszüge mit Anhängern in München). Gegenüber konventionellen Gelenk- und Doppeldeckerbussen bieten sie eine um bis zu 40 Prozent höhere Fahrgastkapazität und somit die Möglichkeit, den weiteren Nachfrageanstieg in der wachsenden Stadt effektiv und effizient bewältigen zu können.

Der Aufgabenträger hält daher den Einsatz von Großraumbussen auf stark belasteten Buslinien, die mittelfristig nicht für die Umstellung auf Straßenbahnbetrieb vorgesehen sind, für sinnvoll. Ihr Einsatz erfordert allerdings bestimmte infrastrukturelle Anpassungen (beispielsweise Nutzlängen Haltestellen).

**Tabelle 6: Charakteristika von Großraumbussen**

	Doppeldecker
<b>Gesamtkapazität</b>	<b>ca. 140</b>
davon Sitzplätze	ca. 60
davon Stehplätze	ca. 80
Investitionskosten im Verhältnis zum Standardlinienbus	1,7 bis 1,8
Energieverbrauch im Verhältnis zum Standardlinienbus	1,65
Jahresbetriebskosten im Verhältnis zum Standardlinienbus	1,3

## 2.3 Zwischenfazit

Für eine möglichst effiziente Bewältigung der Fahrgastnachfrage im Busverkehr werden in Berlin verschiedene Fahrzeugtypen benötigt. Neben den bereits heute eingesetzten Fahrzeugtypen Kleinbus mit 7 Metern, Midibus mit 9 Metern, Standardbus mit 12 Metern (EN), Gelenkbus mit 18 Metern (GN) und Doppeldecker mit 13,7 Metern (DL) ist perspektivisch auch der Einsatz von Großraumbussen notwendig, um auf stark ausgelasteten Buslinien, die mittelfristig noch nicht auf Straßenbahnbetrieb umgestellt werden können, ein attraktives und leistungsfähiges Angebot gewährleisten zu können.

In Abhängigkeit von den Einsatzbedingungen müssen die Busse unterschiedliche Reichweiten pro Tag bewältigen können. Die Spannbreite reicht hier von Umläufen mit weniger als 150 Kilometer pro Tag – insbesondere bei HVZ-Verstärkern – bis über 400 Kilometer pro Tag, beispielsweise bei Linien, die ein 24-Stunden-Angebot aufweisen.

Mit Umsetzung der im NVP 2019–2023 benannten Angebotsmaßnahmen wird das vom Busverkehr zu erbringende Leistungsvolumen trotz Straßenausbaus weiter steigen, einerseits durch die generelle Verdichtung des Busangebotes und andererseits durch die Erschließung neuer Wohn- und Entwicklungsgebiete. Der langfristige Fahrzeugbedarf je Fahrzeugtyp und Reichweite wurde gemäß Tabelle 1 überschlägig ermittelt.

Der so skizzierte Busbestand für 2018 beziehungsweise 2030 ist Aufsetzpunkt der verkehrlichen, klimapolitischen und wirtschaftlichen Bewertungen alternativer Antriebe.

## 3 Stand alternativer Antriebstechnik im Jahr 2018

Als Ersatz von dieselbetriebenen Bussen stehen verschiedene alternative Antriebstechniken mit unterschiedlichem Entwicklungsstand zur Verfügung. Als Energieträger kommen Ökostrom, Gas oder Wasserstoff in Frage. Elektrofahrzeuge mit Batteriespeichern zeichnen sich dabei durch eine hohe Energieeffizienz aus. Für den Betrieb solcher Fahrzeuge stehen mehrere Ladekonzepte zur Auswahl, die unterschiedliche Batteriespeichervermögen aufweisen sowie Betriebs- und Infrastrukturaufwände erfordern.

### 3.1 Antriebsenergien und Ladetechniken im Busbereich

Die Energiewende, die verstärkte Verfolgung lokaler Klimaschutzziele und die durch EU-Vorgaben getriebene Entwicklung von Luftreinhalteplänen mit Zielen insbesondere zur  $\text{NO}_x$ -Minderung haben in den vergangenen Jahren im öffentlichen Verkehr zu einer zunehmenden Erprobung und Verbreitung alternativer Antriebstechniken geführt. Die verschiedenen Technologien weisen in der Primärenergieeffizienz teilweise deutliche Unterschiede auf (vergleiche Tabelle 7).

**Tabelle 7: Primärenergieeffizienz von verfügbaren alternativen Antrieben beziehungsweise nicht-fossilen Antriebsenergien**

Antriebsenergie	Anmerkungen/Differenzierungen	Primärenergie-Wirkungsgrad
Elektrizität (Ökostrom)	Trolleybus	74,7 %
	E-Bus – Streckenladung	71,0 %
	E-Bus – Depotladung	69,4 %
	E-Bus – Gelegenheitsladung	65,1 %
Brennstoffzelle/ Wasserstoff	erzeugt aus regenerativer Elektrizität (Power to X)	28,3 %
Gas aus Flüssigtreibstoff		22,8 %

Quelle: CNB aus Daten von TU Dresden, *Stand und Entwicklungstendenzen bei elektrisch betriebenen Linienbussen*, 2017 und Schaufenster Mobilität, *E-Bus Berlin – Gemeinsamer Abschlussbericht*, 2016 (Elektrizität und Wasserstoff)  
 Karlsruher Institut für Technologie, *Power-to-Gas mit hohem Wirkungsgrad*, 2018 und FEV GmbH, *FEV entwickelt neue Großmotorenfamilie*, 2017 (Gas)

#### 3.1.1 Brennstoffzellentechnologie

In der Brennstoffzellentechnologie wird durch die Reaktion von Wasserstoff und Sauerstoff in einer Brennstoffzelle elektrische Energie erzeugt, die für den Antrieb des Fahrzeugs genutzt wird. Der Energieträger Wasserstoff kann durch Elektrolyse erzeugt oder als Nebenprodukt chemischer Prozesse gewonnen werden. Der Sauerstoff wird aus der Umgebungsluft entnommen. Neben dem Einsatz als Zusatzaggregat zur Verlängerung der Reichweiten (Range Extender) werden derzeit zahlreiche Busse erprobt, deren Antriebe vollständig auf der Brennstoffzellentechnologie basieren. Mit einer Tankfüllung Wasserstoff lassen sich Reichweiten von über 300 Kilometer erreichen.

Allerdings ist der Primärenergiewirkungsgrad dieser Technologie unter Berücksichtigung des Energiebedarfs zur Erzeugung des Wasserstoffs mit 0,25 bis 0,3 deutlich geringer als der eines reinen Elektrobusses (vergleiche Tabelle 7). Dies liegt an den aufwändigen Umwandlungsprozessen zur Erzeugung von Wasserstoff aus Strom (Elektrolyse, Verdichtung), die derzeit mit erheblichen Energieverlusten verbunden sind, und an dem Wirkungsgrad der Brennstoffzellen.

Mit der Verwendung von Wasserstoff als industriellem Nebenprodukt muss keine zusätzliche Energie zur Erzeugung des Kraftstoffs verbraucht werden. Jedoch sind in Berlin und Brandenburg die entsprechenden Erzeugnisse nicht ausreichend verfügbar, um den Busverkehr in der Region und insbesondere in Berlin auf diese Technologie umzustellen. Eine entsprechende Produktion müsste erst aufgebaut werden, alternativ müsste Wasserstoff kostenaufwändig nach Berlin transportiert werden. Daher wird die Brennstoffzellentechnologie für Berlin gegenwärtig nicht weiterverfolgt.

### 3.1.2 CNG-Technologie

Erdgasbetriebene Busse auf Basis von CNG (*Compressed Natural Gas*) weisen keine ökologischen Vorteile gegenüber dieselbetriebenen Bussen der neuesten Generation auf. Neueste Euro-VI-Dieselbusse emittieren nach Zulassungsmessungen 0,17 Gramm NO<sub>x</sub> pro Kilowattstunde (ISC-Messung) und 0,31 Gramm NO<sub>x</sub> pro Kilowattstunde bei Messungen im realen Berliner Stadtverkehr.<sup>5</sup> Die Emissionen bei Euro-VI-CNG-Bussen liegen bei 0,22 Gramm NO<sub>x</sub> pro Kilowattstunde.<sup>6</sup> Der Ausstoß von CO<sub>2</sub> liegt im Berliner Praxistest neuester Euro-VI-Dieselbusse bei 1.400 Gramm CO<sub>2</sub> pro Kilometer. Dieses liegt am unteren Ende der Literaturangaben für CNG-Busse mit 1.400 bis 1.800 Gramm CO<sub>2</sub> pro Kilometer.<sup>7</sup> Mit der Verwendung von Ökostrom zur Erzeugung von Methan (Power-To-Gas) kann eine nicht-fossile Energieversorgung für den Betrieb von gasangetriebenen Bussen mit CNG gewährleistet werden. Der Energiebedarf bei der Umwandlung von Ökostrom in synthetisches Methan (Power-To-Gas) und der Wirkungsgrad von Gasantrieben führen zu einem sehr hohen Primärenergiebedarf dieser Technologie (vergleiche Tabelle 7).

Mit der Verwendung von Biogas steigt die Primärenergieeffizienz dieses Antriebskonzeptes. Biogas aus Reststoffen steht jedoch nur in begrenztem Umfang zur Verfügung. Eine Erzeugung von Biogas aus Anbaubiomasse zur Versorgung von Fahrzeugen wird vom Sachverständigenrat für Umweltfragen abgelehnt, da diese zu Nutzungskonkurrenzen um Anbauflächen zur Nahrungsmittelproduktion führt, die sozial und ökologisch nicht zu vertreten sind.<sup>8</sup>

### 3.1.3 Elektromobilität

In Abhängigkeit von unterschiedlichen topografischen, verkehrlichen und betrieblichen Rahmenbedingungen existiert ein weites Spektrum an Elektrobusskonzepten, die sich in erster Linie in der Form der Ladetechnik unterscheiden.

5 Angaben von der BVG AöR übermittelt.

6 Vergleiche Prof. Dr. Ralph Pütz: *Umwelteigenschaften im Praxistest – Vergleich von Stickoxid-, Feinstaub- und CO<sub>2</sub>-Emissionen von Diesel- und Erdgasbussen*; dena-Workshop „Erdgas und Biomethan im ÖPNV“, Berlin 23. Februar 2017, Folie 11; nach Fahrzeug- und Motorentyp können sich Abweichungen ergeben.

7 Angaben von der BVG AöR übermittelt. Die BVG weist zudem darauf hin, dass die Ist-Verbräuche von CNG-Bussen bei Erprobungen im Berliner Stadtverkehr um 15 bis 20 Prozent oberhalb der Herstellerangaben lagen und daher davon auszugehen ist, dass die realen Abgaswerte der CNG-Fahrzeuge oberhalb der der Literaturwerte liegen werden.

8 Vergleiche Tz 113 im Sachverständigenrat für Umweltfragen, *Umsteuern erforderlich: Klimaschutz im Verkehrssektor, Sondergutachten November 2017*, Berlin, 2017, ISBN 978-3-947370-11-5

### 3.1.3.1 Klassischer Oberleitungsbus (Trolleybus)

Als Antriebsenergie kommt die unmittelbare Zuführung von Strom aus regenerativen Energiequellen im laufenden Fahrbetrieb durch Oberleitungen in Frage. Der Bedarf an Primärenergie ist beim Trolleybus besonders gering, da Elektromotoren über gute Wirkungsgrade verfügen und der Strom nicht in Batterien zwischengespeichert werden muss. Der Trolleybus ist jedoch vollständig oberleitungsgebunden, was einerseits zu einem hohen Infrastrukturbedarf und andererseits zu einer geringen betrieblichen Flexibilität führt. Zwar verfügen die meisten Konzepte über Dieselaggregate oder kleine Energiespeicher, um im Havariefall kürzere Strecken oberleitungsfrei zurücklegen zu können, diese eignen sich jedoch nicht für planmäßige Verkehre. Hinzu kommt die Kritik an der im Bereich von Verzweigungen durch die technisch erforderlichen Fahrdrabtweichen vergleichsweise komplexe Oberleitungsinfrastruktur, die insbesondere in städtebaulich sensiblen Bereichen kaum durchsetzbar ist. Die Wiedereinführung des klassischen Oberleitungsbus-ses mit vollständigem Betrieb über Oberleitung wird daher für Berlin nicht vorgesehen.

### 3.1.3.2 Batteriebuskonzepte

Die größte Gruppe elektrisch angetriebener Busse im ÖPNV sind Batteriebusse. Diese beziehen ihre Antriebsenergie vornehmlich aus fahrzeugseitigen Energiespeichern. Fahrzeuge mit Elektromotoren, deren Antriebsenergie mit Strom aus erneuerbaren Quellen generiert wird, weisen grundsätzlich einen hohen Primärenergiewirkungsgrad auf. Unterschiede ergeben sich jedoch in der Form der Nachladung der fahrzeugseitigen Energiespeicher.

- **Depotlader:** Bei diesem Konzept wird den Fahrzeugen üblicherweise über Nacht im Betriebshof die für den Betrieb notwendige Energie zugeführt. Die Nachladung erfolgt bei niedrigen Ladeleistungen, was batterieschonend wirkt. Der tägliche Betrieb wird ohne zusätzliche Nachladung der Batterien absolviert, sofern die Fahrzeuge über ausreichende Reichweiten verfügen. Entsprechend benötigen die Fahrzeuge relativ große und schwere Energiespeicher, um die für den Linieneinsatz relevanten Distanzen zurücklegen zu können.
- **Gelegenheitslader (beziehungsweise Endstellenlader):** Hier wird den Fahrzeugen an festen Punkten entlang des Linienweges die benötigte Energie zugeführt. In der wissenschaftlichen Diskussion und Erprobung befinden sich derzeit vor allem stationäre konduktive und induktive Nachladesysteme. Vorwiegend werden die Wendezeiten an den Endhaltestellen zur Nachladung der Batterien genutzt, wobei aufgrund der kurzen zur Verfügung stehenden Wende- und Pausenzeiten die Ladung mit hohen Leistungen erfolgen muss. Entsprechend treten bei der Energieübertragung zwischen der Schnellladestation und dem Fahrzeug höhere Verluste auf, die zu einer leichten Minderung der Energieeffizienz bei diesem Konzept führen. Die Schnellladung wirkt sich zudem negativ auf die Lebensdauer der Energiespeicher aus.
- **Streckenlader:** Bei diesem Ansatz werden die Energiespeicher der E-Busse während der Fahrt im Fahrgastbetrieb abschnittsweise unter einer Oberleitung aufgeladen. Im Vergleich zu konventionellen Oberleitungsbusen verfügen Busse mit Streckenladung über Batterien, mit denen sie in Abhängigkeit der Systemauslegung mehrere Kilometer vollelektrisch fahrdrabtunabhängig zurücklegen können. Diese E-Busse werden auch In-Motion-Charger oder Batterie-Oberleitungsbusse benannt. Praxiserfahrungen in anderen Städten zeigen, dass für einen vollelektrischen Betrieb lediglich die Hälfte der Strecke mit Oberleitung ausgestattet werden muss. Infolge der kontinuierlichen und batterieschonenden Energieübertragung über die Oberleitungen wird bei diesem Konzept die höchste Energieeffizienz in der Gruppe der Batteriebusse erzielt.

- **Akkuwechsel (Swapping):** Bei diesem E-Bus-Konzept werden die Fahrzeugbatterien bei Bedarf an dafür vorgesehenen und ausgebauten Stützpunkten (typischerweise Endhaltestellen) mit vollgeladenen Batterien getauscht, damit der E-Bus den Einsatz fortsetzen kann. Die Nachladung der Batterien erfolgt in den entsprechenden Stützpunkten. Der Austausch der Batterien erfordert einen Zeitbedarf von circa 10 Minuten. Üblicherweise ist für den Umgang mit Hochvoltbatterien entsprechend ausgebildetes Personal notwendig. Die ausgewählten Endhaltestellen sind infrastrukturell für die Nachladung und den Austausch der Batterien auszustatten. Das Konzept wurde in China in den Jahren 2008 bis 2013 verfolgt. Aufgrund des aufwändigen Tauschprozesses, des Infrastrukturaufwandes sowie der Lagerkosten für die Batterien wird dieses Konzept jedoch mittlerweile zugunsten der vorgenannten Ladekonzepte sukzessive abgewickelt. Dieses Ladekonzept wird aus den vorgenannten Gründen für Berlin nicht betrachtet.

### 3.1.4 Fazit: Technologieoffenheit, Fokussierung auf den Elektrobus für Berlin

Bei den verfügbaren alternativen Antriebstechnologien zur Umstellung des Dieselmotorsverkehrs lassen sich die gesetzten Umweltziele für Berlin mit Blick auf Energieeffizienz und Klimaschutz perspektivisch nach heutigem Stand am besten durch elektrische Fahrzeuge erzielen. Die verfügbaren Technologien erfüllen grundsätzlich alle benannten Handlungsziele:

- die verkehrsbedingten Beeinträchtigungen von Klima und Umwelt werden durch Einsatz von mit Ökostrom angetriebenen Fahrzeugen gelöst;
- die gesundheitlichen Beeinträchtigungen bezüglich Luftschadstoffen und Lärm werden mit den emissionsfreien und im Vergleich zu Dieselmotoren deutlich leiseren Elektromotoren verringert und
- die Anforderungen an einen energieeffizienten Einsatz der verfügbaren Ressourcen werden berücksichtigt.

In dem gegenwärtig sehr dynamischen Markt der Elektrobusse stehen mehrere Ladekonzepte für die unterschiedlichen Einsatzprofile innerhalb des vielfältigen und komplexen Berliner Busverkehrs zur Verfügung.

Bei der technischen Verbesserung bestehender Technologien oder der Entwicklung neuer technischer Lösungen, die den Anforderungen des Mobilitätsgesetzes entsprechen würden, werden diese Technologien in den Lösungsraum aufzunehmen sein. Dieses gilt insbesondere bei einer deutlichen Verringerung der Kosten, bei erhöhter Sicherheit der Infrastruktur und bei einer – derzeit aber nicht absehbaren – Verringerung des Primärenergiebedarfs bei Brennstoffzellen- und Power-To-Gas-Technologien.

### 3.2 Praktische Einsatzbarkeit verschiedener E-Bus-Alternativen

Die elektrischen Bussysteme weisen verschiedene Systemeigenschaften auf, aus denen sich unterschiedliche Einsatzperspektiven ergeben. (vergleiche Tabelle 8 sowie Kapitel 3.2.1, 3.2.2 und 3.2.3).

**Tabelle 8: Ladekonzepte für den Betrieb von Elektrobussen**

Kriterien	Depotlader	Endstellenlader	Streckenlader
Lademöglichkeit	ausschließlich im Depot	nachts im Depot, tagsüber an den Endhaltestellen (Schnellladestation)	nachts im Depot, tagsüber während der Fahrt (Oberleitung)
Ladezeit	mehrere Stunden	4 bis 8 Minuten	im Fahrgastbetrieb
Batteriegröße	~ 300 bis 450 kWh	~ 100 bis 200 kWh	~ 35 bis 70 kWh
Reichweite außerhalb des Betriebshofs	derzeit 150 bis 200 km, abhängig von der Entwicklung der Batterietechnik	unbegrenzt in Abhängigkeit von verfügbarer Ladeinfrastruktur und Ladezeit	unbegrenzt in Abhängigkeit von verfügbarer Ladeinfrastruktur

#### 3.2.1 E-Bus – Depotlader

Unter optimalen Einsatzbedingungen erreichen Batteriebusse derzeit eine Reichweite von bis zu 250 Kilometer. Da das Zusatzgewicht der Energiespeicher die maximal zulässige Zuladung begrenzt, hätte eine weitere Maximierung der Reichweite durch Verwendung von größeren Batterien signifikante Einbußen der Fahrgastkapazität zur Folge.

Bei der Bewertung der Reichweite ist zu beachten, dass Nebenverbraucher wie Heizung, Klimatisierung und Kneeling erhebliche Auswirkungen auf den Gesamtenergieverbrauch haben. Unter zum Beispiel ungünstigen klimatischen Einsatzbedingungen kann der Verbrauch dafür an den Energiebedarf für die Traktion heranreichen, was – insbesondere bei Temperaturen unter 5 Grad Celsius – zu erheblichen Einschränkungen der Reichweite führt. Unter Berücksichtigung einer Reichweitenreserve zur Gewährleistung der Betriebsstabilität und Absicherung der Verkehrsleistungen muss die planerisch zu unterlegende Reichweite für den Einsatz von Batteriebussen daher deutlich niedriger angesetzt werden. Im Ergebnis ist mit Depotladern unter den gegenwärtigen technischen Rahmenbedingungen ein 1:1-Ersatz von Dieselstandardbussen (12 Meter) mit einer verlässlichen Fahrleistung von 150 Kilometer zwischen zwei jeweils mehrstündigen Ladevorgängen möglich.

Dies wird sich erst ändern, wenn mit der Entwicklung von leistungsfähigen Wärmepumpen der temperaturabhängige Energieverbrauch für Klimatisierung und Heizung der vollelektrischen Depotlader deutlich reduziert wird. Bisher bleibt als Alternative für die Speisung aus der Batterie des Busses nur, mit herkömmlichen Kraftstoffen die Zusatzaggregate zur Versorgung der Nebenverbraucher zu betreiben. Hierbei sind allerdings auch nicht-fossile Varianten denkbar.

Die Ladeinfrastruktur für die Depotlader befindet sich auf den Betriebshöfen (vergleiche Kapitel 3.4.1). Um die Ein- und Aussetzfahrten zu verkürzen und damit den Fahrzeugmehrbedarf trotz begrenzter Reichweite zu senken, bestünde eine Strategie darin, dezentralisierte Ladestellen zur Nachladung der Depotlader während des Tages im ganzen Stadtgebiet zu bauen. Dort können die Fahrzeugbatterien regelmäßig nachladen, in der Regel unter so geringen Ladeleistungen wie im Betriebshof. Dieses Konzept wird bei der Implementation neuer E-Bus-Systeme in chinesischen Städten bereits eingesetzt. Eine Umsetzung dieser Strategie in Berlin setzt aber eine entsprechende Verfügbarkeit der Flächen für die Elektromobilität voraus. Der Zeit- und Kostenaufwand für die Planung und den Bau dieser dezentralisierten Ladestellen muss zudem mit dem Nutzen (niedriger Fahrzeugbedarf) abgewogen werden.

Die Depotladung wird hauptsächlich bei Busbetrieben in China für die Umstellung des Dieselbusbetriebs auf emissionsfreie E-Busse eingesetzt. Mit mehr als 8.000 E-Bussen hat beispielsweise Shenzhen, die Heimatstadt des E-Busherstellers BYD, den gesamten Busverkehr auf elektrische Fahrzeuge umgestellt und besitzt die größte elektrische Busflotte der Welt. Dort ist der Busverkehr jedoch eher für die kleinteilige Flächenerschließung und die schnelle Anbindung zum leistungsfähigen U-Bahn-Netz konzipiert. Daher sind hauptsächlich nur 10 bis 12 Meter lange E-Busse im Einsatz, die unter optimalen Umfeldbedingungen ebenfalls Reichweiten von bis zu 250 Kilometer aufweisen. Nach Erfahrungen in Peking sinkt die Reichweite bei kalten Temperaturen aufgrund des oben bereits beschriebenen Energiebedarfs für die Heizung jedoch auf etwa 100 Kilometer.

In Europa werden Depotlader in vielen Städten getestet. Busflotten mit mehr als 20 E-Standardbussen im Regelbetrieb sind bisher erst in London, Paris und in Amsterdam zu finden. London hat zudem die Beschaffung von elektrischen Doppeldeckern angekündigt. Jedoch handelt es sich dort um ein kleineres Modell als in Berlin mit einer deutlich kleineren Fahrgastkapazität (zweiachsig, 10,8 Meter). Zudem ist die operative Reichweite dieser Fahrzeuge derzeit nicht bekannt. Für dreiachsige Doppeldecker sind die Freiheitsgrade für zusätzliche Batterien aufgrund der beschränkten Achslasten und Platz äußerst begrenzt. Depotlader mit dieser Gefäßgröße wurden bisher nur in China entwickelt und weisen eine sehr geringe Reichweite von maximal 60 Kilometer auf.

Soweit sich die Reichweiten bei E-Bussen durch Fortentwicklung der Batterietechnik nicht deutlich verbessern werden, eignet sich die Depotladung daher nur für kleine Fahrzeuge (bis 12 Meter) und kurze Umläufe. Im Berliner Busverkehr, der einerseits von großen Fahrzeugen (Doppeldecker- und Gelenkbussen) und andererseits von langen täglichen Reichweiten über 300 bis hin zu 400 Kilometer geprägt ist, kann mit diesem Ladekonzept lediglich ein geringer Anteil der Umläufe ersetzt werden. Bei Umläufen über die derzeit verfügbare Reichweite entsteht entsprechend nach Einschätzung der BVG aufgrund der erforderlichen Anpassung der Umlaufkonzeption und der einzuplanenden Ladezeiten im Depot ein Fahrzeugmehrbedarf von 20 bis 50 Prozent im Vergleich zum Betrieb mit Dieselnbussen. Bezogen auf die Gesamtfahrzeugflotte im Berliner Busverkehr – ohne Berücksichtigung etwaiger kapazitätsmindernder Effekte infolge der erforderlichen Substitution von Gelenk- und Doppeldeckerbussen mit E-Standardbussen – entspricht dies einer Fahrzeugmehrung von etwa 300 bis 800 Fahrzeugen. Es würden sich schon für die Beschaffung der zusätzlichen Fahrzeuge überschlägig Mehrinvestitionen von 180 bis 400 Millionen Euro ergeben, nicht gerechnet den Bedarf an zusätzlichem Fahrpersonal und Betriebshofflächen.<sup>9</sup> Dies ist betriebswirtschaftlich und kapazitatativ nicht darstellbar.

Die Vorteile dieses Konzepts liegen allerdings im freizügigem und flexiblen Fahrzeugeinsatz und der Tatsache, dass keine Ladeinfrastruktur außerhalb des Depots notwendig wird.

### 3.2.2 E-Bus – Endstellenlader

Durch die punktuelle Nachladung kommt der Endstellenlader unter Berücksichtigung von Strecken- und Einsatzcharakteristik mit kleineren Batterien im Vergleich zu Depotladern aus, was sich entsprechend positiv auf das Gesamtgewicht und die Fahrgastkapazität auswirkt. In Abhängigkeit von der Ladeinfrastruktur kann die Reichweite gegenüber Depotladern beliebig erhöht werden und der Einsatz von E-Gelenkbussen wird möglich. Hierbei ist jedoch zu beachten, dass sich die Schnellladung mit hoher Ladeleistung negativ auf die Lebensdauer der Fahrzeugbatterien auswirken kann.

<sup>9</sup> Dieser ergibt sich aus den zusätzlichen Zeiten für Ein- und Ausrückfahrten und der Anforderung eines kontinuierlichen Taktes ohne Lücken auf fast allen Berliner Buslinien.

Die Wendezeiten an den Endhaltestellen, die derzeit betrieblich als Zeitpuffer zwischen zwei Fahrten und für die notwendigen Fahrerpausen relevant sind, werden für die Nachladung der Fahrzeugbatterien genutzt. Dabei werden für den Ladevorgang in Abhängigkeit von den Einsatzbedingungen mindestens vier bis acht Minuten benötigt. Vor dem Hintergrund der insbesondere im Stadtverkehr auftretenden Beeinträchtigungen im Betriebsablauf unterliegen die Fahrzeiten zum Teil erheblichen Schwankungen. Bei Berücksichtigung der notwendigen Ladezeiten inklusive eines ausreichenden Zeitpuffers, werden bei häufig befahrenen Linien längere Standzeiten an den Endhaltestellen erforderlich. Hieraus resultierende Anpassungen der Umläufe ergeben für den Endstellenlader einen Fahrzeugmehrbedarf zwischen 10 und 20 Prozent gegenüber dem Einsatz von Dieselnissen.<sup>10</sup>

Bei diesem E-Bus-Konzept ist ferner zu beachten, dass die Ladeinfrastruktur zusätzliche Flächen im öffentlichen Straßenraum bedingt. In Anbetracht der begrenzten Flächenverfügbarkeit im öffentlichen Raum ist die entsprechende Ladeinfrastruktur jedoch nicht überall realisierbar. In Abhängigkeit der Anzahl wendender Fahrzeuge und der Ladezeiten sind zudem immer ausreichend Ladevorrichtungen vorzuhalten (vergleiche Kapitel 3.4.2.1). Hierbei ist zu beachten, dass die ortsfeste Ladeinfrastruktur an den Endhaltestellen die Flexibilität für Linienmaßnahmen, insbesondere zur Verlegung von Endstellen oder der Einrichtung von Zwischenendstellen, deutlich einschränkt. Taktverdichtungen erfordern ebenfalls eine entsprechende Anpassung der Anzahl an verfügbaren Ladesäulen an den Endhaltestellen. Auch auf den Betriebshöfen werden Ladeeinrichtungen benötigt, da die Batterien zur Maximierung der Lebensdauer regelmäßig mit niedrigen Ladeleistungen geladen werden sollen.

Die Endstellenladung wird bereits in Berlin (Linie 204, induktive Nachladung) und in mehreren Städten in Europa getestet (induktive und konduktive Nachladung). Wie beim Depotlader ist derzeit die Anzahl von E-Fahrzeugen noch sehr gering. Nur in den Niederlanden sind zwei große E-Gelenkbusflotten (Amsterdam-Schiphol: 100 Fahrzeuge und Eindhoven: 43 Fahrzeuge) in Betrieb.

In Peking ist seit Ende 2017 eine Linie mit Gelenkbussen in Betrieb, auf der die Fahrzeuge mit Ladeleistungen von bis zu 450 Kilowatt in wenigen Minuten an den Endhaltestellen nachgeladen werden.

### 3.2.3 E-Bus mit Nachladung während der Fahrt (Streckenladung)

Diese Form der Nachladung während der Fahrt über einen oberirdischen Fahrdrabt wird bereits heute mit sehr hoher Zuverlässigkeit bei Trolleybus-Systemen in verschiedenen Städten in Europa angewendet. Infolge der kontinuierlichen Nachladung über längere Strecken benötigen die Fahrzeuge nur relativ kleine Energiespeicher (etwa Faktor 0,3 bis 0,6 gegenüber Endstellenladern), um die notwendigen Reichweiten zu erzielen. Dies kommt unmittelbar dem Fahrzeuggewicht und der somit verfügbaren Fahrgastkapazität zu Gute.

Das geringere Batteriegewicht, die relativ batterieschonende Ladeströme und die effiziente Energieversorgung (mindestens zur Hälfte direkt aus der Fahrleitung ohne Zwischenspeicherung in Batterien) sorgen zudem für einen niedrigen spezifischen Energieverbrauch.

<sup>10</sup> Im Busverkehr um den Flughafen Schiphol (Amsterdam) wurden 86 Dieselfahrzeuge durch 100 E-Gelenkbusse mit Endstellenladung (450 Kilowatt) ersetzt. Der Fahrzeugmehrbedarf beträgt 16,3 Prozent. (Harry Hondius, Stadtverkehr 2018/07-08)

Bei diesem Nachladekonzept fallen auch die zuvor beschriebenen Konfliktpunkte in Bezug auf den Energiebedarf von Nebenverbrauchern nicht so stark ins Gewicht, da die zusätzlich benötigte Energie teilweise direkt aus den Oberleitungen bezogen werden kann. Durch die regelmäßige Nachladung der Batterien während der Fahrt verfügen die Busse über eine unbegrenzte Reichweite. Auch die bestehenden, unter betriebswirtschaftlichen Aspekten optimierten Umlauf- und Fahrzeugeinsatzpläne des Dieselmotors können im Wesentlichen beibehalten werden, da keine zusätzliche Ladezeit im Stand eingeplant werden muss. Entsprechend ergibt sich aus diesem Konzept kein unmittelbarer Fahrzeugmehrbedarf. Die Technologie kann zudem grundsätzlich für alle Fahrzeuggrößen inklusive der 24 Meter langen Großraumbusse angewendet werden.

Neben der Umrüstung der Betriebshöfe werden bei diesem Konzept Oberleitungen auf bestimmten Streckenabschnitten des Busnetzes zur Ladung der Fahrzeugbatterien benötigt sowie Unterwerke zur Versorgung der Fahrdrähte. Im Vergleich zu einer Ladesäule, an der jeweils nur ein Endstellenlader nachladen kann, können unter der Oberleitung mehrere Streckenlader (zum Beispiel von verschiedenen parallel fahrenden Linien) gleichzeitig auf demselben Ladeabschnitt versorgt werden. Unter Berücksichtigung solcher Synergien kann die Ladeinfrastruktur durch eine strategische Verteilung der Ladeabschnitte effizient ausgenutzt werden (vergleiche Kapitel 3.4.2.3). Bei Bedarf können Streckenlader analog zu Endstellenladern auch an ortsfesten Oberleitungspunkten an Endhaltestellen nachladen. Solche Ladepunkte können beispielweise für die Bedienung eines Linienastes mit geringem Verkehr eine wirtschaftlich sinnvolle Alternative zur Versorgung der E-Busse darstellen.

Innerhalb der letzten fünf Jahre hat die Streckenladung insbesondere in China an Bedeutung gewonnen. In Shanghai, Jinan, Qingdao und Peking wird diese Technologie für häufig befahrene Buslinien genutzt. Die chinesische Hauptstadt verfügt mit mehr als 2.000 E-Bussen über die größte Streckenlader-Flotte weltweit. Zusätzlich zu 13 bestehenden Trolleybus-Linien aus dem historischen Netz wurden seit 2013 schrittweise 14 neue Linien auf Streckenladung umgestellt, inklusive dreier BRT-Linien (dichte Takte, Gelenkbusse, 150.000 Fahrgäste pro Tag).<sup>11</sup> In den kommenden Jahren sollen sechs weitere Linien auf Streckenladung umgestellt werden.

Auf dem amerikanischen Kontinent werden E-Standardbusse und E-Gelenkbusse in Serienmengen mit Streckenladung für die Erneuerung von Trolleybusflotten (San Francisco, Seattle) und die Umstellung von Dieselbuslinien auf elektrische Antriebe (Dayton/USA, Rosario/Argentinien) beschafft. In Europa verkehren E-Busse mit Streckenladung unter anderem in Zürich, Mailand, Gdynia, Cagliari und Linz, wo 24-m-Doppelgelenkbusse elektrisch betrieben werden, aber auch in Esslingen und Solingen, wo bereits Oberleitungsnetze für konventionelle O-Busse vorhanden sind und das Streckennetz dadurch flexibler wird. In Prag, wo der Betrieb von O-Bussen vor 45 Jahren eingestellt wurde, wurde im Oktober 2017 eine etwa 1.000 Meter lange Oberleitungsstrecke in Betrieb genommen. Damit sollen dort erste Erfahrungen mit diesem Ladekonzept für E-Busse gewonnen werden. Nach ersten Rückmeldungen der Prager Verkehrsbetriebe konnten die E-Busse selbst bei winterlichen Temperaturen zuverlässig fahren. Entsprechend werden Planungen für die Elektrifizierung weiterer Strecken und die Beschaffung von 15 Fahrzeugen vorangetrieben.<sup>12</sup> In Vorbereitung ist der Einsatz von Streckenladern in Salzburg.

11 Beijing Public Transport Corporation, <https://v.qq.com/x/page/h0605hs-map9.html>

12 Prague.tv, Prague to expand electric buses, <https://prague.tv/en/s72/Directory/c207-Travel/n14008-Prague-to-expand-electric-buses>

Streckenladung ist grundsätzlich für alle Fahrzeugtypen und Reichweiten umsetzbar, am Markt sind derzeit Standard-, Gelenk- und Doppelgelenkbusse erhältlich. Lediglich Doppeldeckerbusse mit Streckenladung sind bislang nicht entwickelt worden, wären aber grundsätzlich möglich.<sup>13</sup> Die Oberleitung kann auch im Mischbetrieb mit Ein- und Doppeldeckern von beiden Fahrzeugtypen genutzt werden. Unter Berücksichtigung der hohen Lebensdauer von Fahrzeugen und Ladeinfrastruktur weist diese Technologie insbesondere bei Linien mit häufigem Verkehr beziehungsweise bei Bündelungen von mehreren Linien eine hohe Wirtschaftlichkeit auf. Zudem hat die Technologie in der Gruppe der Batteriebusse die höchste Energieeffizienz.

### 3.2.4 Exkurs: Fahrzeughersteller für Elektrobusse

Über Jahrzehnte haben Hersteller von Bussen ihre Ressourcen annähernd vollständig in der Weiterentwicklung des Dieselantriebs gebunden. Entsprechend steht die Entwicklung von E-Bussen derzeit noch nahezu am Anfang. Gerade die in Europa etablierten Hersteller von Bussen konnten bisher überwiegend keine serienreifen E-Busse anbieten.

Der überwiegende Anteil der weltweit produzierten E-Busse wird von chinesischen Herstellern für den regionalen Markt geliefert. Laut „eBus Report 2016“ von ZeEUS (Zero Emission Urban Bus System) fuhren 2015 circa 98 Prozent aller weltweit betriebenen E-Busse in China. Dabei ist zu beachten, dass dort Investitionen in die Entwicklung von E-Bussen und deren Kauf durch die Verkehrsunternehmen staatlich massiv gefördert wurden. Dies hatte eine starke Entwicklung der chinesischen E-Bus-Industrie und Verbreitung von E-Bussen zur Folge, die in Europa noch nicht stattgefunden hat.

Ab 2019 werden die ersten Batteriebusse in Serienproduktion von europäischen Herstellern erwartet. Insbesondere die deutschen Hersteller Daimler (Evobus) und MAN (ab 2020) haben zu diesem Zeitpunkt ihre ersten E-Busmodelle angekündigt. Für die kommenden Jahre ist davon auszugehen, dass das Angebot der Hersteller der wachsenden Nachfrage an E-Bussen folgen wird und die Produktionszahlen dementsprechend angepasst werden, dies betrifft auch die Weiterentwicklung möglicher Fahrzeug- und Ladekonzepte.

Dagegen werden im europäischen Raum bereits seit Jahrzehnten Trolleybusse produziert. Auf dieser Basis können Busse mit Streckenladung bereits heute mit serienreifen Komponenten angeboten werden. Die elektrische Ausrüstung von Streckenladern wird von mehreren Firmen in Kooperation mit den jeweiligen Fahrzeugherstellern angeboten:

- Kiepe Electric (Deutschland),
- ABB (Schweiz),
- Siemens (Deutschland).

<sup>13</sup> Grundsätzlich wären Doppeldecker-Streckenlader mit Doppeldecker-O-Bussen vergleichbar, die es früher beispielsweise in Hamburg, London oder Porto gab.

Folgende Fahrzeughersteller bieten derzeit (2018) E-Bus-Modelle in Europa an:

**Tabelle 9: Fahrzeughersteller für elektrische Busse**

Hersteller	Standardbus	Gelenkbus	Großraumbus	Streckenlader (12 bis 14 Meter)
Solaris (PL)	x	x		x
Van Hool (BE)	x	x	x	x
Sileo (DE)	x	x	x	
Hess (CH)	x	x	x	x
VDL (NL)	x	x		
Volvo (Schweden)	x	x		
Iveco/Heuliez (IT/FR)	x	x		x
Daimler/Evobus (DE)	x			
Scania (Schweden)	x			
Ebusco (NL)	x			
Alstom (FR)	x			
ADL-BYD (UK/China)	x			
Bolloré (FR)	x			
Yutong (China)	x			x**
Foton (China)	x			x**

\* Nur für den chinesischen Markt geliefert.

### 3.3 Wirtschaftlichkeit elektrischer Bussysteme

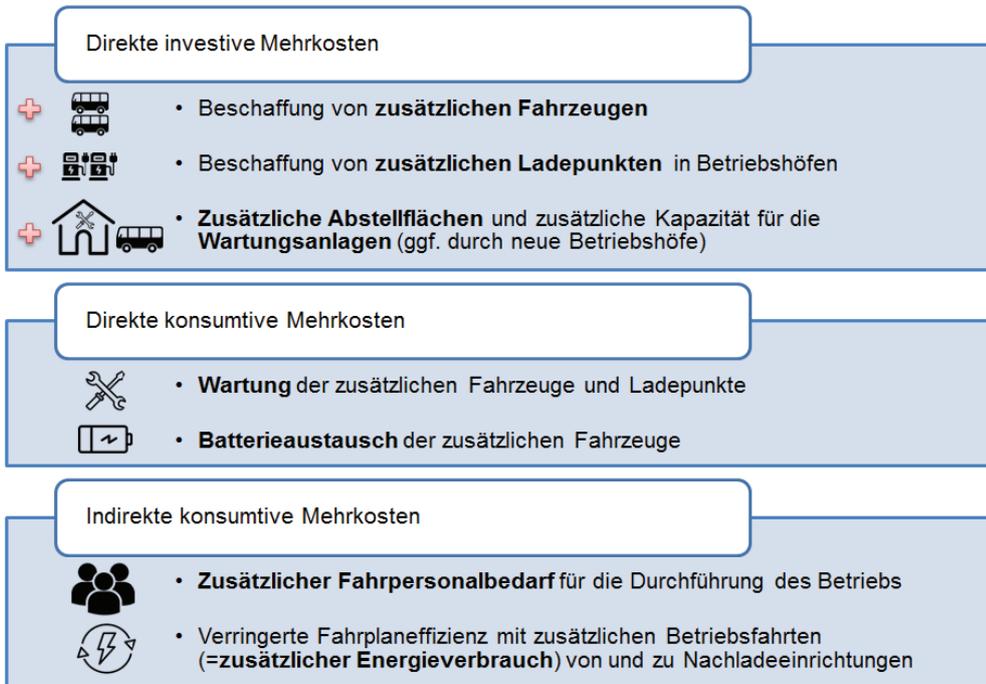
Auf Grundlage bisheriger Erfahrungen ist beim Einsatz von elektrischen Bussystemen mit deutlich höheren Investitionskosten im Vergleich zu vergleichbaren Dieselfahrzeugen zu rechnen.

In Abhängigkeit der Fahrzeughersteller und Fahrzeugkonfiguration liegen die Kosten von Depot- und Endstellenladern bei Faktor 2 bis 2,5 gegenüber entsprechenden Dieselfahrzeugen. Diese Mehrkosten beruhen im Wesentlichen auf den Entwicklungskosten der neuen Fahrzeuge und hohen Batteriekosten. Obwohl E-Busse aufgrund des geringeren Energiebedarfs und Instandhaltungsaufwands verglichen mit Dieselmotoren niedrigere laufleistungsabhängige Kosten aufweisen, muss bei der Umstellung auf elektrische Fahrzeuge mit deutlichen Mehrkosten gerechnet werden. Im Rahmen von Erprobungen sollen diese Kosten genauer ermittelt werden.

Auch E-Busse mit Streckenladung weisen hohe spezifische Investitionskosten auf, die gegenüber vergleichbaren Dieselmotoren trotz der Verwendung bereits bewährter Komponenten etwa mit Faktor zwei veranschlagt werden müssen. Allerdings ist bei Streckenladern aufgrund des geringeren Anteils mechanisch belasteter Komponenten mit Blick auf die Praxiserfahrung in O-Bus-Betrieben (Fahrzeuge mit Nutzungsdauern deutlich über 18 Jahre) von einer höheren Lebensdauer auszugehen. Entsprechend nivellieren sich die hohen Investitionskosten über den langen Abschreibungszeitraum der Fahrzeuge. Dieselmotoren erreichen im Vergleich lediglich eine Lebensdauer von 10 bis 12 Jahren. Auch bei reinen Batteriebusen ist nicht von einer höheren Lebensdauer auszugehen. Diese weisen zwar auch einen geringen Anteil mechanisch belasteter Komponenten auf, jedoch wirkt sich das zusätzliche Batteriegewicht (3 bis 4 Tonnen bei aktuellen Depotladern) negativ auf die Festigkeit der Fahrzeugkonstruktion und somit die Lebensdauer aus.

Der Mehrbedarf an Fahrzeugen bei der Umstellung von Dieselnissen auf E-Busse mit niedrigerer Leistungsfähigkeit hat zudem erhebliche Auswirkungen auf die Wirtschaftlichkeit des Systems. Eine Vergrößerung der Busflotte zieht eine Erhöhung der Investitionen für die Fahrzeuge und die Infrastruktur sowie der laufenden Betriebskosten nach sich (vergleiche Abbildung 4).

**Abbildung 4: Auswirkung des Fahrzeugmehrbedarfs auf die Mehrkosten des E-Bus-Betriebs**



Credit Icons: Freepik, GoodWare

Neben den spezifischen Fahrzeugkosten sind bei elektrischen Bussystemen daher auch Kosten für die Ladeinfrastruktur sowie Betriebshofanpassungen zu berücksichtigen (vergleiche Kapitel 3.4).

### 3.4 Infrastrukturanforderungen des Elektrobusses

Unabhängig von dem ausgewählten E-Bus-Konzept erfordert die Umstellung des Busverkehrs auf Elektromobilität wesentliche infrastrukturelle Anpassungen sowie die Einrichtung von einer leistungsfähigen Ladeinfrastruktur zur Versorgung der E-Fahrzeuge. Parallel zu der Beschaffung von Fahrzeugen muss eine entsprechende Infrastruktur zu deren Wartung, Abstellung und Nachladung geschaffen werden.

#### 3.4.1 Infrastruktur in Betriebshof

Die sechs Busbetriebshöfe der BVG sind derzeit grundsätzlich für die Wartung von Dieselnissen ausgerüstet. Lediglich der Betriebshof in der Indira-Gandhi-Straße verfügt über wenige Ladestationen für den Betrieb der bereits genutzten vier E-Busse. Der schrittweise Zulauf von E-Bussen mit neuartiger Antriebstechnik stellt neue betriebliche Anforderungen, die mit einer Anpassung der Infrastruktur in den Betriebshöfen verbunden sind. Dies betrifft folgende infrastrukturelle Maßnahmen:

- Einrichtung von Ladepunkten im Betriebshof zur Versorgung der E-Bus-Flotte.
- Erhöhung der Stromnetzanschlussleistungsfähigkeit entsprechend den benötigten Leistungen (circa 70 Kilowatt pro Bus) bei der gleichzeitigen Nachladung von einer hohen Zahl an Fahrzeugen (zum Beispiel während der Nachtpause). Diese ist mit dem Netzbetreiber frühzeitig abzustimmen. In diesem Zusammenhang ist die Einrichtung von stationären Speichern auf Betriebshöfen zur Entlastung von Strombedarfsspitzen zu prüfen. Hierbei wird während der Schwachlastzeiten die überschüssige Energie in stationären Energiespeichern zwischengespeichert. Dagegen kann die zwischengespeicherte Energie in den Spitzenzeiten den Bussen zur Verfügung gestellt werden. Der Nutzen ist in Abhängigkeit vom Ladekonzept und Aufwand (Kosten, Flächenbedarf, Energieeffizienz) zu ermitteln.
- Umrüstung von Werkstätten für die spezifische Wartung von elektrisch angetriebenen Fahrzeugen (Wartung von Elementen auf dem Dach der E-Busse, gegebenenfalls Stromabnehmer, Verwendung spezifischer Diagnosegeräte sowie spezielle isolierte Werkzeuge für elektrische Fahrzeuge).

Infolge des zusätzlichen Platzbedarfs für die Ladeinfrastruktur und des abhängig von der ausgewählten Technologie entstehenden Fahrzeugmehrbedarfs ergibt sich ein zusätzlicher Flächenbedarf auf den Betriebshöfen der BVG. Weiterhin ist auch zu beachten, dass E-Busse mit großen Batterien aus Brandschutzgründen nicht so eng wie Dieselnisse im Block abgestellt werden dürfen, um im Brandfall ein Übergreifen des Feuers auf andere Fahrzeuge zu vermeiden.

Bei Streckenladern ist aufgrund des möglichen 1:1-Ersatzes von Dieselnissen nicht von einem signifikanten Flächenmehrbedarf auszugehen. In Abhängigkeit von der Form der Nachladung (Ladepunkte oder Oberleitungen) auf den Betriebshöfen ist auch hierfür nicht zwingend von einem zusätzlichen Flächenbedarf auszugehen.

Es ist zu untersuchen, inwieweit die vorhandenen Betriebshofkapazitäten den entsprechenden Flächenbedarf abdecken können. In Abhängigkeit von der langfristigen Migrationsstrategie sind die vorhandenen Abstellkapazitäten gegebenenfalls durch den Neubau von Betriebshöfen oder Service-Stützpunkten zur Nachladung und Reinigung von E-Bussen zu erweitern. Bei der Abschätzung des notwendigen Flächenbedarfs sind zum Teil gegensätzliche Treiber zu berücksichtigen:

- generelle Leistungsmehrung im Busverkehr zur Abdeckung der steigenden Nachfrage in der wachsenden Stadt;
- Einsatz größerer Fahrzeuge auf Linien, die bereits mit dichten Takten bedient werden;
- Umstellung hochbelasteter Buslinien auf Straßenbahnbetrieb.

Das Land Berlin und die BVG werden in der Laufzeit des Nahverkehrsplans die bereits aufgenommenen Untersuchungen zum Bedarf an zusätzlichen Abstellkapazitäten für den Busverkehr abschließen. Dabei ist auch die Einrichtung von Ladestützpunkten an strategisch besonders geeigneten Stellen im Stadtbereich zu prüfen. Diese Bedarfe sind frühzeitig mit den zuständigen Senatsverwaltungen gesamtstädtisch abzustimmen und in der Fortschreibung des Flächennutzungsplans zu beachten.

### 3.4.2 Infrastruktur im Stadtbereich

Insbesondere bei Endstellenladern und Streckenladern ist eine Ladeinfrastruktur im öffentlichen Raum erforderlich, jedoch mit unterschiedlichem zusätzlichen Flächenbedarf. Infolge der Nachladung während der Betriebszeit lassen sich vor allem bei Linien mit hohen Laufleistungen die Produktivzeiten der einzelnen Fahrzeuge maximieren und der sich daraus ergebende Fahrzeugmehrbedarf minimieren. Diesem Zweck dienen auch dezentrale Ladestellen für Depotlader.

Die Ladeeinrichtungen erfordern eine entsprechende Leistungsfähigkeit der stromversorgenden Leitungen und Unterwerke. Hierbei sind Synergien durch die gemeinsame Nutzung der elektrotechnischen Anlagen des Berliner Straßenbahnnetzes anzustreben, soweit entsprechende Vorleistungen und Kapazitäten gegeben sind.

#### 3.4.2.1 Dezentrale Ladestellen für Depotlader

Beim Depotlader erfolgt die Nachladung im Regelfall während der nächtlichen Betriebspause in den Betriebshöfen. Aufgrund der nach aktuellem Stand der Technik kurzen Reichweiten von Depotladern reicht die Batterieladung im Regelfall nicht für das erforderliche Tagespensum aus. Durch die Einrichtung von kleinen Service- und Nachladeflächen mit 10 bis 20 Ladepositionen im Stadtbereich können die Ein- und Ausrückwege für die Depotlader und damit der Fahrzeug- und Personalbedarf minimiert werden. Diese dezentralen Ladestellen sind in Abhängigkeit der Flächenverfügbarkeit vorzugsweise an mehreren Punkten in der Stadt in unmittelbarer Nähe zu Korridoren mit einer Vielzahl von mit Depotladern bedienten Umläufen einzurichten.

#### 3.4.2.2 Endstellenlader

Beim Endstellenlader sind an den Endhaltestellen Schnellladestationen vorzusehen, um unter wirtschaftlichen und betrieblichen Gesichtspunkten die Produktivzeiten der Fahrzeuge soweit wie möglich zu maximieren. Bei Linien mit dichten Takten sind aufgrund der erforderlichen Ladezeit und des zwischen zwei Fahrten für die Betriebsstabilität notwendigen Zeitpuffers mehrere Ladesäulen an den Endhaltestellen vorzusehen. Für die Schnellladung müssen die einzelnen Ladesäulen zwischen 250 und 450 Kilowatt zur Verfügung stellen, um in Abhängigkeit von der Fahrzeug- und Batteriegröße optimale Ladezeiten zu gewährleisten. Eine Herausforderung dabei ist die Sicherstellung des Leistungsbedarfs für die punktuellen und unregelmäßigen Schnellladungen an unterschiedlichen Stellen der Stadt.

Im Hinblick auf die ungewisse Entwicklung der Batterietechnologie einerseits und die langfristige Sicherung angebotsplanerischer Flexibilität in der dynamischen Metropole Berlin andererseits ist es geboten, zunächst Busknoten mit entsprechender Ladeinfrastruktur auszustatten. Unter Berücksichtigung der hohen Kosten der Ladestation von etwa 1.000 Euro pro Kilowatt muss langfristig eine hinreichende Auslastung der Infrastruktur gewährleistet werden. An Busknoten, wie dem S- und U-Bahnhof Zoologischer Garten oder dem S- und U-Bahnhof Rathaus Steglitz, die täglich von einer großen Zahl dort verkehrender oder endender Busse unterschiedlicher Linien frequentiert werden, ist dies eher der Fall als an von lediglich einer Linie bedienten Endhaltestellen. Die Installation von Ladesäulen erfordert einen Anschluss ans Stromversorgungsnetz und muss in Abstimmung mit dem Netzbetreiber, mit dem Ladeinfrastrukturbüro (LIB), der zuständigen Senatsverwaltung sowie mit dem zuständigen Bezirk in seiner Funktion als Straßenbaulastträger und unterer Straßenverkehrsbehörde erfolgen.

### 3.4.2.3 Streckenladung

Bei einem E-Busbetrieb mit Streckenladung müssen die entsprechenden Strecken abschnittsweise mit Oberleitung ausgestattet werden. Es wird die gleiche Spannung wie bei O-Bus-, Straßenbahn oder U-Bahn-Systemen (750 V) verwendet. So können die Fahrzeuge Leistungen bis 600 Kilowatt zur gleichzeitigen Energieversorgung der Antriebsmotoren, der Nebenverbraucher und der Batterien erhalten, wobei Ladeleistungen von lediglich circa 100 bis 150 Kilowatt für die Nachladung der Batterien benötigt werden. Mit der Nachladung der Batterien während der Fahrt werden die Stromlasten räumlich und zeitlich verteilt und damit der Leistungsbedarf für die Nachladung im Betriebshof reduziert. Maßgebliche Rechtsgrundlage für die Errichtung dieser Ladeabschnitte ist § 41 PBefG. Demnach ist für die Einrichtung von Fahrleitungen ein Planfeststellungsverfahren nach § 28 PBefG analog zum Bau einer Straßenbahnstrecke erforderlich. Die Kosten für die elektrotechnischen Anlagen liegen bei etwa 1.000.000 Euro pro Kilometer. Allerdings sind diese von mehreren Fahrzeugen gleichzeitig nutzbar. Die Lebensdauer der Infrastruktur liegt bei mindestens 30 Jahren.

Mit den Batterien kann der Streckenlader mehrere Kilometer ohne Fahrdrabt verkehren. Der Umfang der benötigten Infrastruktur hängt von den möglichen Netzsynergien ab. Für den Betrieb einer Linie mit Streckenladern müssen in der Regel mindestens 50 Prozent der Strecke mit Fahrleitung ausgestattet werden, wobei höhere Elektrifizierungsgrade im Hinblick auf die Energieeffizienz, die Senkung des Batteriebedarfs und die Struktur des Stromversorgungsnetzes durchaus sinnvoll sein können. Bei einer Optimierung der Verteilung der Oberleitungsstrecken kann der Anteil an Oberleitungen für das gesamte Netz reduziert werden. So können mehrere Linien bei sich überlagernden Streckenabschnitten partiell mit einem Ladeabschnitt versorgt werden (vergleiche Abbildung 5). Im Vergleich zu konventionellen Trolleybussystemen kann bei der Streckenladung auf kostenintensive, instandhaltungsaufwändige und unästhetische Fahrleitungselemente, insbesondere auf Kreuzungen und Weichen, verzichtet werden.

Abbildung 5: Potenzielle Ausnutzung von Ladeinfrastruktur durch Überlagerungen von Linien



Quelle: Eigene Darstellung aus Laurent, *Optimierung des Oberleitungsnetzes bei einer Elektrifizierung des Busverkehrs mittels In-Motion-Charging am Beispiel der Berliner Verkehrsbetriebe*, 2017

### 3.4.2.4 Mobile Ladeinfrastruktur für temporäre Busverkehre

Bei der Einrichtung von Schienenersatzverkehren (SEV) mit Bussen kann es vorkommen, dass für einen kurzen Zeitraum umfangreiche Busleistungen auf Verkehrsachsen erbracht werden, auf denen normalerweise kein oder nur geringer Busverkehr besteht. Für einen elektrischen Betrieb des SEV ist der Einsatz von Depotladern vorzuziehen, da keine Ladeinfrastruktur im Stadtbereich notwendig wird. Bei großen SEV-Maßnahmen kann jedoch nur mit großen Fahrzeugen (Gelenkbussen) die erforderliche Kapazität zum Ersatz der Züge sichergestellt werden. In Anbetracht der geringen Reichweiten von Depotladern bei diesem Fahrzeugtyp sind hohe Kosten infolge der Fahrzeug- und Personalmehrbedarfe für entsprechende Leistungen zu erwarten.

Mit dem Einsatz von Streckenladern beziehungsweise Endstellenladern entfallen zumindest teilweise diese betrieblichen Nachteile. Es ist jedoch erforderlich, dass die Busse bestehende Ladeinfrastrukturen in der Umgebung zur Nachladung der Batterien nutzen können. Andernfalls muss eine entsprechende Ladeinfrastruktur vor Beginn des SEV errichtet werden. Daher sollen die technischen und die wirtschaftlichen Möglichkeiten von mobilen Ladeinfrastrukturen für solche Nutzungsfälle in der Laufzeit des NVP eingehend untersucht werden.

So könnte auch der Betrieb mit Strecken- oder Endstellenladung bei Unterbrechungen oder temporären Verlegungen von Endhaltestellen flexibler gestaltet werden.

### 3.4.2.5 Stromversorgung

Die Auswirkungen des Betriebs von großen E-Bus-Flotten auf das Berliner Stromnetz sind mit Blick auf die Sicherstellung der Energieverfügbarkeit für die unterschiedlichen Ladekonzepte zu untersuchen. Die gleichzeitige Nachladung einer E-Bus-Flotte im Betriebshof oder der punktuellen und unregelmäßigen Leistungsbedarf für Schnellladungen an verschiedenen Endhaltestellen stellen unter Berücksichtigung der generell wachsenden Anzahl von elektrischen Gewerbe- und Privatfahrzeugen neue Herausforderungen für das Stromnetz dar. Zur Bewältigung dieser gesamtstädtischen Herausforderung ist eine integrierte Betrachtung von Lösungspotenzialen durchzuführen. Diese ist unter der Federführung der zuständigen Senatsverwaltung und in Abstimmung mit Stromnetzbetreibern, Verkehrsunternehmen und weiteren betroffenen Senatsverwaltung parallel zur Erprobungsphase von E-Bussen zu erarbeiten.

## 3.5 Entwicklung der Batterietechnik

Die Kosten für Batterien machen den überwiegenden Anteil der Investitionsmehrkosten von E-Bussen aus. Zudem determinieren die spezifischen Eigenschaften der Batterien, wie Energiedichte und Leistungsfähigkeit, die möglichen Einsatzbedingungen der unterschiedlichen elektrischen Fahrzeugtypen. Von daher sind die zu erwartenden Fortschritte bei der Entwicklung der Batterietechnik für die Bestimmung der Zieltechnologie und die Ableitung des Migrationspfades für die Umstellung des Busverkehrs auf elektrische Antriebe von hoher Relevanz.

### 3.5.1 Stand der Batterietechnik (2018)

Im Bereich der Elektromobilität haben sich Lithium-Ion-Batterien (Li-Ion) bewährt, da sie hohe Energiedichten sowie eine hohe Lebensdauer (Zyklusfestigkeit) im Vergleich zu anderen Batterietechnologien aufweisen. Infolge des wachsenden Bedarfs an leistungsfähigen Energiespeichern im Energie- und Verkehrssektor wird die Entwicklung und Verbesserung der Batterietechnik intensiv vorangetrieben. Entsprechend konnten in den letzten Jahren erhebliche Fortschritte erzielt werden. So wurde bei Li-Ion-Batteriezellen innerhalb von zehn Jahren gleichzeitig eine Verdopplung der Energiedichte und eine Senkung der Herstellungskosten um 80 Prozent erzielt.<sup>14</sup> Nach dem aktuellen Stand bewegen sich die Energiedichten und die Kosten von Li-Ion-Batterien bei etwa 150 bis 250 Kilowattstunde pro Kilogramm und 220 bis 300 Euro pro Kilowattstunde für E-Autos. Im E-Bus-Bereich muss die Batterietechnologie infolge der hohen jährlichen Fahrleistungen, des erforderlichen Leistungsbedarfs und des im Vergleich zu PKW höheren Energieverbrauchs weitergehenden Ansprüchen hinsichtlich der Leistungsfähigkeit, Zyklusfestigkeit, Sicherheit und des Speichervermögens genügen. Darüber hinaus ist das Angebot für E-Bus-Batterien auf dem europäischen Markt gegenwärtig noch begrenzt. Dementsprechend ist auch das Kosteniveau von Batterien für E-Busse je nach Batterietechnologie mit einem Faktor 3 bis 5 im Vergleich zu den günstigsten Batteriepreisen für E-Autos zu veranschlagen. Für die ersten E-Busse rechnet die BVG mit Batteriepreisen von 1.500 Euro pro Kilowattstunde. In der aktuellen Literatur (2017 bis 2018) werden jedoch niedrigere Preise angenommen: Laut VerkehrsConsult Dresden-Berlin (VCDB) liegt die Preisspanne bei 800 bis 1.500 Euro pro Kilowattstunde.<sup>15</sup> Dagegen werden Batteriepreise von 600 Euro pro Kilowattstunde von Bloomberg New Energy Finance unterstellt.<sup>16</sup> Das Fraunhofer-Institut geht von Preisen von 750 bis 1.000 Euro pro Kilowattstunde für E-Busse aus.<sup>17</sup>

14 Vergleiche The Economist, the growth of lithium-ion battery power, 14. August 2017.

15 Vergleiche VCDB, Herausforderungen beim Betrieb mit elektrisch betriebenen Bussen, 2017.

16 Vergleiche Bloomberg New Energy Finance, Electric Buses in Cities, Driving towards cleaner air and lower CO<sub>2</sub>, 2018, S. 29.

17 Vergleiche Fraunhofer-Institut, Ansätze zur Standardisierung und Zielkosten für Elektrobusse, 2017.

Die Energiedichte, die Leistungsfähigkeit, die Zyklenfestigkeit, die Sicherheit und die Kosten der Batterien hängen von der verwendeten Material-Kombination in den Batteriezellen ab. Beim Depotlader sind hohe Batteriekapazitäten erforderlich. Von daher sind dort Batterien mit hohen Energiedichten relevant, um das Fahrzeuggewicht im Rahmen zu halten und sinnvolle Reichweiten zu ermöglichen. Hingegen spielt die Schnellladefähigkeit der Batterien eine kleinere Rolle, da der Depotlader über mehrere Stunden unter niedrigen Leistungen nachgeladen werden kann. Für eine Nachladung mit höheren Leistungen und kurzen Ladezeiten wie beim Endstellenlader beziehungsweise beim Streckenlader werden Hochleistungsbatterien benötigt. Je nach der gewünschten E-Bus-Strategie sind unterschiedliche Batterietypen geeignet<sup>18</sup>:

- Bei **Hochenergiebatterien** wird die Energiedichte (Kapazität) der Batterien maximiert. Zu dieser Kategorie gehören Li-Ion-Batterien der Art Nickel-Mangan-Kobalt (NMC) sowie Nickel-Kobalt-Aluminium (NCA). Mit einem guten Verhältnis zwischen Lebensdauer (etwa 6 Jahre), Sicherheit und Kosten sowie hohe Energiedichten weisen NMC-Batterien günstige Eigenschaften für den Depotlader auf. Mit Blick auf die geringe Ressourcenverfügbarkeit von Kobalt entstehen jedoch Risiken über die künftigen Produktionskosten Kobalt-basierter Batterien. NCA-Batterien haben höhere Energiedichten (etwa Faktor 1,3 bis 1,5) aber auch eine niedrigere Sicherheit hinsichtlich der Erwärmung der Zellen.
- Für **Hochleistungsbatterien**, die mit hohen Leistungen nachgeladen werden können, können Batterien der Art Lithium-Eisen-Phosphat (LFP) und Lithium-Titanat-Oxid (LTO) bei E-Bussen verwendet werden.
  - Die LFP-Technologie hat gegenüber NMC eine leicht geringere Energiedichte (etwa Faktor 0,6 bis 0,8), ein gutes Verhalten beim Schnellladen und eine höhere Sicherheit. Diese Batterietechnologie ist daher sowohl für die Depotladung als auch für Ladekonzepte mit höheren Ladeleistungen vorteilhaft. Sie ist bei chinesischen Herstellern die am häufigsten eingesetzte Batterietechnologie und weist eine ähnliche Lebensdauer wie NMC-Batterien auf. Trotz des zunehmenden Interesses chinesischer Hersteller an NMC-Batterien<sup>19</sup> wegen ihrer höheren Kapazitäten könnten LFP-Batterien in Abhängigkeit der steigenden Preise von Kobalt noch häufig verwendet werden.<sup>20</sup>
  - Die LTO-Technologie geht mit spezifischen Vorteilen für Endstellenlader und Streckenlader einher, da sie bei sehr hohen Ladeleistungen eine hohe Sicherheit aufweist. Die Technologie zeichnet sich zudem durch eine deutlich höhere Zyklenfestigkeit (etwa Faktor 2 bis 3 im Vergleich zu NMC und LFP), ein gutes Verhalten auch bei extremen Temperaturen und eine hohe Nutzbarkeit der Batterien bis 80 Prozent der Gesamtkapazität aus. Bei anderen Batteriearten wird dagegen von Batterieherstellern empfohlen, nicht mehr als 50 bis 60 Prozent der Batterien zu nutzen, um ihre Lebensdauer zu maximieren. Demgegenüber stehen jedoch relativ geringe Energiedichten (etwa Faktor 0,3 bis 0,4 gegenüber NMC) und hohe Kosten (Faktor 1,5 bis 3 gegenüber NMC).

### 3.5.2 Entwicklungsperspektive bis 2030

#### 3.5.2.1 Entwicklung der Leistungsfähigkeit von Batterien

Inwieweit sich der Trend sowohl für die Preise als auch für die Leistungsfähigkeit der Li-Ion-Batterien zukünftig fortsetzen wird, ist mit starken Unsicherheiten verbunden. Nach den Fortschritten der letzten zwanzig Jahre besteht im Bereich der Li-Ion-Batterien laut Experten lediglich Optimierungspotenzial der aktuellen Batteriegenerationen. Signifikante Sprünge in der Leistungsfähigkeit und Energiedichte von Batterien sind jedoch nicht zu erwarten.

18 Vergleiche Buchmann, Types of Lithium-Ion, 2017 (letzte Aktualisierung).

19 Vergleiche Fraunhofer Institut, Energiespeicher-Roadmap (Update 2017), 2017, S. 14.

20 Vergleiche Bloomberg New Energy Finance, Electric Buses in Cities, Driving towards cleaner air and lower CO<sub>2</sub>, 2018, S. 25.

Aufgrund der bereits ausgereizten physikalischen Eigenschaften von Li-Ion-Batterien und der bei weiterer Erhöhung der Energiedichte zunehmenden Sicherheitsrisiken (Brandgefahr) sind daher bis 2030 lediglich geringe Verbesserungen des Speichervermögens zu erwarten. In der im Jahr 2017 aktualisierten Energiespeicher-Roadmap des Fraunhofer-Instituts wird für den Zeitraum 2018 bis 2030 eine Erhöhung der Batteriekapazitäten um 10 bis 50 Prozent prognostiziert.<sup>21</sup> Der Batteriehersteller Panasonic, der insbesondere Tesla versorgt, geht dagegen von einer mittelfristigen Erhöhung der Energiedichte für seine Li-Ion-Batterien um 30 Prozent aus.<sup>22</sup>

Zudem konnten bisher bei NMC- und LFP-Batterien wenige Fortschritte in der Verbesserung des Batterieverhaltens bei kalten Temperaturen gemacht werden. Kalte Temperaturen schränken aufgrund der langsameren Ionen-Diffusion und der höheren internen Widerstände in den Li-Ion-Zellen die Speicherkapazität und den Energiewirkungsgrad der Batterien erheblich ein. Das ist für die verlässliche Energieversorgung von E-Bussen umso kritischer, als bei kalten Temperaturen der Gesamtenergieverbrauch wegen der Beheizung des Innenraums signifikant ansteigt. Wie in Kapitel 3.2.1 beschrieben, führt dies beispielsweise in Peking zu einer Senkung der theoretischen Reichweite der Fahrzeuge von 250 Kilometer auf nur 100 Kilometer in kalten Wintermonaten.<sup>23</sup> Das Laden von kalten Li-Ion-Batterien wirkt sich zudem negativ auf deren Lebensdauer aus. Vor jedem Einsatz ist dementsprechend eine Konditionierung der Batterien zur gewünschten Arbeitstemperatur im Betriebshof erforderlich.

Neben der Entwicklung von Li-Ion-Batterien werden viele neuartige Batterietechnologien zur Speicherung elektrischer Energie mit dem Ziel erforscht, eine deutliche Erhöhung der Batterieleistungsfähigkeit zu erreichen. Im Fokus der Forschung liegt derzeit die Entwicklung von Feststoffbatterien. Mit diesen soll einerseits der Brandgefahr weiter entgegengewirkt und andererseits eine höhere Energiedichte ohne Beeinträchtigung der Sicherheit erreicht werden. In Anbetracht der erforderlichen Entwicklungszeiten solcher Technologien vom Labor bis zur Alltagstauglichkeit sind allerdings konkrete Anwendungsperspektiven im Bereich der Elektrofahrzeuge und insbesondere bei E-Bussen erst nach 2030 denkbar.<sup>24</sup> Bis 2030 stellen daher Li-Ion-Batterien weiterhin die einzige Energiespeicher-Alternative für E-Busse dar.

### 3.5.2.2 Kostenentwicklung von Batterien

Zwar werden weltweit die Produktionskapazitäten von Batterien an die wachsende Nachfrage angepasst. Die daraus resultierenden Mengeneffekte werden kurzfristig zu weiter sinkenden Preisen führen. Mit der Entwicklung des E-Bus-Marktes und der Serienbeschaffung von E-Fahrzeugen könnten sich die Batteriepreise für E-Busse mittelfristig denen von E-Autos annähern.<sup>25</sup> Allerdings werden für die Batterieentwicklung derzeit spezifische Rohstoffe wie Lithium, Kobalt, Grafit, Nickel, Mangan oder Titan verwendet, die auch für die Herstellung anderer wichtiger Konsumgüter (zum Beispiel Smartphones und IT) benötigt werden. Es ist davon auszugehen, dass infolge des wachsenden Verbrauchs sowohl im Mobilitätssektor als auch in anderen Dienstleistungssektoren entsprechende Konkurrenzen um diese teilweise begrenzten Rohstoffe entstehen, die mittelfristig mindestens zu einer Konsolidierung der Marktpreise führen. In der vom Fraunhofer-Institut erstellten Energiespeicher-Roadmap wird für den Zeitraum 2018 bis 2030 eine Senkung der Herstellungskosten für Li-Ion-Batteriezellen von 25 bis 50 Prozent prognostiziert.<sup>26</sup>

21 Vergleiche Fraunhofer Institut, Energiespeicher-Roadmap (Update 2017), S. 19.

22 Vergleiche Teslarati, Tesla partner Panasonic says 30% energy density increase in lithium-ion batteries possible, 10. April 2017.

23 Vergleiche Süddeutsche Zeitung, In der E-Mobilität ist China einen großen Sprung voraus, 21. April 2018.

24 Vergleiche Fraunhofer Institut, Energiespeicher-Roadmap (Update 2017), S. 112.

25 Vergleiche C40 Cities, Electric Buses in Cities, 2018.

26 Vergleiche Fraunhofer Institut, Energiespeicher-Roadmap (Update 2017), S. 15.

### 3.5.2.3 Entwicklung der Reichweiten bei reinen Batteriebusen

Die Haupteinschränkung bei reinen Batteriebusen liegt in deren Reichweite. Die Fahrzeuge können aufgrund des hohen Gewichts von Batterien nicht mit beliebig großen Energiespeichern ausgerüstet werden, da dies auch unmittelbar Auswirkungen auf die Fahrgastkapazität und den Energiebedarf hat. Im Vergleich zu Dieselsebussen, die mit einem vollen Tank über 500 Kilometer fahren können, werden bei den ersten Serien-Elektrofahrzeugen mit Depotladung lediglich eine Reichweite von 150 Kilometer für 12-m-Standardbusse garantiert (Stand Ende 2018). Dabei ist auch zu beachten, dass der Energiebedarf für die Heizung durch eine separate Zusatzenergiequelle gedeckt wird, um die Beibehaltung der Reichweite bei kalten Temperaturen zu gewährleisten.

**Tabelle 10: Entwicklungsperspektive der Reichweiten reiner Batteriebusse mit Depotladung**

Fahrzeugtyp	Stand 2018	Entwicklung kurzfristig	Entwicklung mittelfristig (Horizont 2030)
Standardbus	150 km	200 km im Horizont 2020*	240 bis 300 km**
Gelenkbus	Serienfahrzeuge noch nicht verfügbar	200 km im Horizont 2020*	220 bis 270 km**
Doppeldecker (dreiaxsig)	noch nicht verfügbar***	markttaugliche Reichweiten nicht in Aussicht	markttaugliche Reichweiten nicht in Aussicht
<p>* Aktuelle Ankündigungen von europäischen Fahrzeugherstellern (MAN, Daimler, Solaris...).</p> <p>** Es wird eine Entwicklung der Reichweite von 20 bis 50 Prozent im Vergleich zum Jahr 2020 unterstellt.</p> <p>*** In China werden dreiachsige elektrische Doppeldecker betrieben, deren Reichweite mit 60 Kilometer jedoch sehr gering ist (Quelle: BVG).</p>			

Durch den Einsatz von Batterien mit größeren Kapazitäten bei gleichem Gewicht und die Optimierung der Energieeffizienz von Nebenverbrauchern ist eine Erhöhung der Reichweiten von Depotladern kurz- und mittelfristig zu erwarten. Nach Angaben von europäischen Fahrzeugherstellern sollen 2020 E-Standardbusse mit einer zuverlässigen Reichweite von 200 Kilometer am Markt verfügbar sein, jedoch weiterhin mit einer Zusatzheizung bei kalten Temperaturen.

Bei Gelenkbussen mit höheren Fahrenergiebedarfen befinden sich die Fahrzeughersteller mit Prototypen noch in der Entwicklungsphase. Das potenzielle Einsatzgebiet betrifft vorwiegend laststarke Linien mit langen Bedienzeiten und damit längeren Umläufen als bei Standardbussen (bis über 400 Kilometer). Erste elektrische Seriengelenkbusse als Depotlader werden mit Reichweiten von 200 Kilometer für 2021 angekündigt. Bei der Entwicklung eines elektrischen Doppeldeckers liegt die Herausforderung neben dem höheren Energiebedarf vor allem in der begrenzten Nutzlast und der begrenzten Flächenverfügbarkeit für den Einbau der Energiespeicher. Aufgrund dieser hohen Einschränkung steht ein E-Doppeldecker mit Depotladung unter den für Berlin erforderlichen Einsatzbedingungen (Kapazität für 113 Fahrgäste, zwei Treppen) nicht in Aussicht.

Langfristig ist zwar eine Verbesserung der Leistungsfähigkeiten von Batterien zu erwarten; inwieweit die Reichweite von Depotladern dadurch auf das für Berlin erforderliche Niveau steigen, ist derzeit jedoch nicht sicher abschätzbar. Wahrscheinlich ist jedoch, dass auch langfristig die aktuellen Reichweiten von Dieselfahrzeugen bei Depotladern nicht für alle Fahrzeugtypen erreicht werden. Insbesondere für große Fahrzeuge und lange Umläufe wird die Nachladung von E-Bussen während des Betriebs durch Endstellen- oder Streckenladung perspektivisch notwendig bleiben.

## 4 Migrationspfad zum dekarbonisierten Busverkehr bis 2030

Auf Grundlage der Charakteristika des Berliner Busverkehrs, der verfügbaren Konzepte zum Betrieb mit nicht fossilen Antriebsenergien und deren perspektivisch absehbaren Entwicklung sind voraussichtlich mehrere Ladetechnologien notwendig, um die vielfältigen Anforderungen im Berliner Busverkehr erfüllen zu können. Daher sollen die in Kapitel 3.2 vorgestellten Konzepte zunächst unter Berliner Einsatzbedingungen erprobt werden. Das Land Berlin wird die Testeinsätze kontinuierlich begleiten und anhand festgelegter Kriterien (vergleiche Kapitel 4.1) evaluieren. Auf dieser Basis soll eine zügige Einführung ein oder mehrerer Ladetechnologien im Berliner Busverkehr erreicht werden.

### 4.1 Kriterien zum Systementscheid für die Umstellung des Busverkehrs bis 2030

Die Entscheidung über den passenden Mix an Ladetechnologien soll anhand der im Folgenden benannten Kriterien getroffen werden. Diese sind unter Berücksichtigung der politischen Ziele des Landes Berlin in Abstimmung mit den Verkehrsunternehmen und zuständigen Senatsverwaltungen zu gewichten:

- **Betriebliche Flexibilität:** Dies betrifft den Freiheitsgrad für gewöhnliche Angebotsmaßnahmen wie Linienverlängerungen, Taktverdichtungen und Betriebszeitausdehnungen, sowie die Anpassungsfähigkeit des Systems bei geplanten und ungeplanten Betriebsstörungen (Baumaßnahmen, Falschparker, Straßensperrungen, ausgefallene Versorgungsanlagen).
- **Planungsaufwand und schnelle Realisierbarkeit:** Zeitbedarf für die vollständige Umstellung der Dieselflote auf Fahrzeuge mit alternativen Antrieben mit Blick auf die Flächensicherung, Planung und Bau der benötigten Infrastruktur (zum Beispiel Umbau und Neubau von Betriebshöfen, Ladeinfrastruktur im Stadtbereich, Wasserstofftankanlagen, Stromnetzanschluss), die Verfügbarkeit einsatzreifer Fahrzeuge und die betriebsplanerisch notwendigen Änderungen (Neuplanung der Umläufe).
- **Wirtschaftlichkeit über den Lebenszyklus:** Ein kostengünstiger Betrieb ermöglicht einen sparsamen Einsatz von Landesmitteln sowie die Finanzierung weiterer Maßnahmen für den ÖPNV. Neben den Investitionskosten für Fahrzeuge und Infrastruktur (Abschreibung über die geplante Nutzungsdauer) sollen daher insbesondere die Personal-, Energie- und Instandhaltungskosten inklusive Tausch von antriebsspezifischen Komponenten (Batterie, Brennstoffzelle) während des Lebenszyklus der Fahrzeuge als konsumtive Kosten miteinbezogen werden.
- **Energieeffizienz:** Realisierung eines möglichst niedrigen Primärenergiebedarfs, da regenerative Energie nur in einem endlichen Umfang vorhanden ist. Mit dem Primärenergiebedarf als Messlatte werden sowohl der reine Energiebedarf des Fahrzeugs für den Fahrbetrieb (Tank-to-Wheel) als auch der Energiebedarf für die Bereitstellung der Energie von der Primärquelle bis zum Fahrzeug (Well-to-Tank) berücksichtigt.
- **Nachhaltigkeit:** Sicherstellung eines möglichst sparsamen Ressourcenbedarfs und einer möglichst geringen Umweltbelastung bei Herstellung und Nutzungsdauer der Systemkomponenten (Fahrzeuge, Infrastruktur).

- **Flächensparsamkeit:** In der wachsenden Stadt stehen Flächen im öffentlichen Straßenraum für Pantographen beziehungsweise freie Grundstücksflächen für Betriebshöfe oder dezentrale Servicestandorte nur bedingt zu Verfügung. Um die bereits bestehenden Nutzungskonkurrenzen um freie Flächen in der Stadt nicht unverhältnismäßig durch die Dekarbonisierung zu verschärfen, bedarf es eines Mixes an Ladetechnologien, der sich durch einen minimalen Bedarf an Betriebsflächen für die Nachladung der Busse auszeichnet.
- **Stadtverträglichkeit:** Berücksichtigung einer möglichst geringen Beeinträchtigung sensibler und stadtbildprägender Elemente (beispielsweise Gebäude und Sichtachsen) durch unvermeidbare Infrastrukturmaßnahmen.
- **Produktivität:** Verkehrsunternehmen müssen bundesweit zunehmend mit Fahrpersonalmangel bei gleichzeitig wachsenden Leistungsvolumen und zunehmender Anzahl konkurrierender Unternehmen umgehen. Entsprechend muss ein neues Antriebskonzept beziehungsweise Mix von Antriebskonzepten möglichst nahe am Produktivitätsniveau von Dieselbusflotten liegen. Neben dem Bedarf von Fahrpersonal sind hier auch die zusätzlichen Investitionen in Fahrzeuge und Betriebsflächen zu beachten. Die Produktivität stellt vor diesem Hintergrund ein wesentliches Entscheidungskriterium dar.

## 4.2 Einstieg in den Umstellungsprozess

Das Land Berlin wird in der Laufzeit des Nahverkehrsplans die Rahmenbedingungen für den Einstieg in eine substanzielle und kontinuierliche Umstellung des Busverkehrs auf einen Betrieb mit nicht fossilen Antriebsenergien schaffen. Um Erfahrungen mit dem Betrieb von Elektrobussen im Kontext der Anforderungen des Berliner Busverkehrs zu sammeln, wird die BVG in der Laufzeit des Nahverkehrsplans die Erprobung von Depot-, Endstellenladern und Streckenladern durchführen (vergleiche Abbildung 6).

### 4.2.1 Erprobung Depotladung

Da die Ladeinfrastruktur bei Depotladern für kleine Flotten lediglich im Bereich der Betriebshöfe gebaut werden muss, lässt sich dieses Ladekonzept am schnellsten erproben. Gemäß den gegenwärtigen Einsatzperspektiven von E-Bussen ist in der Laufzeit des NVP zunächst die Beschaffung von insgesamt 120 E-Standardbussen (12 Meter) als Depotlader mit der dafür erforderlichen Lade- und Werkstattinfrastruktur vorgesehen. Um eine optimale betriebliche Integration zu ermöglichen, ist eine Beschaffung in vier Stufen mit jeweils 30 E-Fahrzeugen geplant (vergleiche Abbildung 6). Unter Berücksichtigung einer Reichweitenreserve zur Gewährleistung der Betriebsstabilität und Absicherung der Verkehrsleistungen verfügen die Fahrzeuge über eine Reichweite von 150 Kilometer. In Anbetracht der geringen Erfahrungen mit Depotladern und des Entwicklungsgrades dieser Technologie wird im Rahmen der Hochlaufphase, in Ergänzung des vollelektrischen Antriebs, der Einsatz von Verbrennungs-Zusatzaggregaten zur Versorgung der Nebenverbraucher (Heizung, Klimaanlage und Kneeling) zugelassen. Im Ergebnis der Hochlaufphase ist für folgende Fahrzeuggenerationen der Einsatz von fossilen Zusatzheizungen unter Berücksichtigung der technischen Entwicklung neu zu bewerten. Mittelfristig besteht das Ziel, auch Depotlader vollständig mit elektrischer Energie zu versorgen.

Der Betriebshof Indira-Gandhi-Straße wird für die Stromversorgung und Wartung der 120 E-Busse umgerüstet.

Für die Einflottung der ersten 30 Fahrzeuge wurden zwei Konzepte geprüft. Ausgehend von der Annahme, dass die bestehende Umlaufplanung der BVG betrieblich und wirtschaftlich optimiert ist, sollten die E-Busse ausschließlich auf bestehenden Umläufen mit einer Länge von bis zu 150 Kilometer eingesetzt werden. So bliebe der Fahrzeug- und Personaleinsatz gegenüber dem Einsatz von Dieselnissen konstant. Es zeigte sich jedoch, dass die Fahrzeuge ausgehend vom benannten Betriebshof bei diesem Konzept lediglich im Berufsverkehr für Verstärkerfahrten eingesetzt werden können.

Um die wirtschaftlichen Vorteile der zur Beschaffung anstehenden E-Busse in Bezug auf Energie- und Instandhaltungskosten und die ökologischen Vorteile bestmöglich zu nutzen, ist für eine möglichst hohe Laufleistung der Fahrzeuge zu sorgen.

Daher wurde mit der BVG abgestimmt, dass für die ersten 30 E-Busse die Umläufe auf bestehenden Linien so angepasst werden, dass die umweltfreundlichen Fahrzeuge möglichst lange Einsatzzeiten erreichen. Dies führt jedoch dazu, dass einzelne Fahrzeuge tagsüber auf dem Betriebshof nachladen müssen. Infolge der notwendigen Aus- und Einrückfahrten für die Nachladung wird voraussichtlich in Abhängigkeit von der Liniencharakteristik ein Fahrzeugmehrbedarf gegenüber dem Einsatz von Dieselnissen entstehen.

Zur Minimierung des Fahrzeugmehrbedarfs werden die ausgewählten Linien im Bündel betrachtet und entsprechend ihrer Nähe zum Betriebshof ausgewählt. So können Fahrzeuge zwischen den Linien getauscht und regelmäßig zur Nachladung an den Betriebshof geführt werden, um den Aufwand für Ein- und Ausrückfahrten zu minimieren. Bei der Auswahl der Linien beziehungsweise Linienbündel wurde zudem ein Hauptaugenmerk auf eine möglichst hohe Abdeckung von Gebieten mit hoher  $\text{NO}_x$ - und Lärmbelastung gelegt, um dort ÖPNV-seitig einen weiteren Beitrag zur Luftreinhaltung und zur Lärminderung zu leisten.

Für die weiteren zur Beschaffung vorgesehenen 90 E-Busse werden auf Basis der Erfahrungen mit der ersten Charge die vorherigen Annahmen überprüft und bei Bedarf angepasst. Grundsätzlich ist ein möglichst weitgehender 1:1-Ersatz von Dieselnissen anzustreben.

#### **4.2.2 Erprobung Endstellenladung**

Im Rahmen des Forschungsprojektes „E-MetroBus“ wird die BVG zudem 15 E-Gelenkbusse (18 Meter) mit Endstellenladung auf einer stark belasteten Berliner Buslinie testen. Gemäß aktuellen Planungen werden die Fahrzeuge voraussichtlich auf der Linie 200 zum Einsatz kommen. Diese Linie eignet sich insbesondere aufgrund ihrer Trasse im dichten innerstädtischen Verkehr, auf Achsen mit hohen  $\text{NO}_x$ -Belastungen und aufgrund des verfügbaren Raums für die Ladeinfrastruktur an den beiden Endhaltestellen.

Das Hauptziel dieses Projektes ist die betriebliche Evaluation des Ladens an der Endhaltestelle mit Schnellladesystemen unter erhöhten Lastbedingungen bei dichten Taktzeiten und hohen Tageskilometerleistungen. Die Zuverlässigkeit, der Klimanutzen und die Betriebskosten des Ladekonzepts werden ermittelt. Der Beginn des Probetriebs mit E-Bussen ist in diesem Projekt für das Jahr 2020 vorgesehen.

### 4.2.3 Erprobung Streckenladung

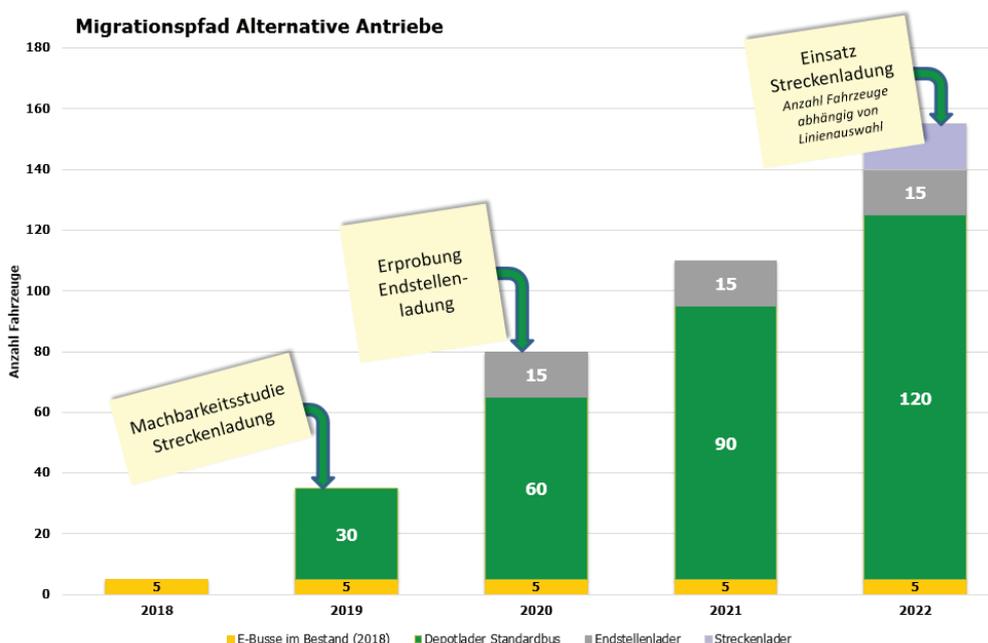
In der Laufzeit des Nahverkehrsplans sind zudem weitergehende Untersuchungen und Planungen für die unverzügliche Erprobung der Streckenladungstechnologie vorgesehen. Zunächst wird voraussichtlich bis zum 2. Quartal 2019 eine Machbarkeitsstudie für die Implementierung von E-Bussen mit Streckenladung abgeschlossen. Im Rahmen der Studie wird die technische Auslegung der Fahrzeuge und der Energieversorgung für den Betrieb eines Teilnetzes der BVG ermittelt. Teil der Studie befasst sich auch mit der stadtverträglichen Gestaltung der Oberleitungsinfrastruktur. Als Untersuchungsgebiet für die Machbarkeitsstudie wurde Berlin-Spandau mit seinem ausgeprägten Busnetz mit dicht befahrenen Linien und Achsen ausgewählt. Das untersuchte Netz stellt keine Konkurrenz zu den im ÖPNV-Bedarfsplan für Spandau vorgesehenen Straßenbahnneubaustrecken und enthält Varianten bei Realisierung der Straßenbahn.

Aufbauend auf die Ergebnisse der Machbarkeitsstudie werden die Planungen für den Testbetrieb beginnen. Erste emissionsfreie Streckenlader könnten demnach 2022 den Betrieb aufnehmen.

Die Streckenladung stellt bisher infolge des sehr niedrigen Batteriebedarfs im Fahrzeug die Alternative mit dem größten Potenzial für den Betrieb von leistungsfähigen elektrischen Doppeldeckern mit den Berliner Einsatzverhältnissen dar (Fahrgastkapazität von über 110 Fahrgästen, zwei Treppen).

Grundsätzlich wird der Einsatz der Streckenladung nicht auf Achsen geplant, wo eine Straßenbahnstrecke bis 2035 entstehen soll, um die vorhandenen Planungsressourcen für die Infrastruktur effizient einzusetzen. Bei der Planung der Infrastruktur für die Stromversorgung ist jedoch darauf zu achten, dass diese im Falle einer langfristig möglichen Umstellung auf Straßenbahnbetrieb weitergenutzt werden können.

Abbildung 6: Migrationspfad alternative Antriebe in der Laufzeit des Nahverkehrsplans



#### **4.2.4 Weitere Aspekte beim Umstellungsprozess**

Für die weitere Umstellung von Busleistungen auf nicht-fossile Antriebsenergien sind vorwiegend Linien mit hoher Relevanz zur Minimierung der gesundheitlichen Beeinträchtigungen (Lärm, Stickoxide, Feinstaub) auszuwählen.

## Literaturverzeichnis

Bloomberg New Energy Finance, *Electric Buses in Cities, Driving towards Cleaner Air and lower CO<sub>2</sub>*, 2018

FEV GmbH, *FEV entwickelt neue Großmotorenfamilie*, 2017, online verfügbar unter: <http://magazine.fev.com/de/neuer-mittelschnelllaeufer-fuer-schiffsanwendungen-und-mehr/>, zuletzt geprüft am 27. Juni 2018

Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI, *Energiespeicher-Roadmap (Update 2017)*, Karlsruhe, 2017, online verfügbar unter: <https://www.isi.fraunhofer.de/content/dam/isi/dokumente/cct/lib/Energiespeicher-Roadmap-Dezember-2017.pdf>

Fraunhofer-Institut für Verkehrs- und Infrastruktursysteme IVI, *Ansätze zur Standardisierung und Zielkosten für Elektrobusse*, Dresden, 2017, online verfügbar unter: [https://www.erneuerbar-mobil.de/sites/default/files/2018-04/Abschlussbericht\\_E-Bus-Standard.pdf](https://www.erneuerbar-mobil.de/sites/default/files/2018-04/Abschlussbericht_E-Bus-Standard.pdf)

Karlsruher Institut für Technologie, *Power-to-Gas mit hohem Wirkungsgrad*, 2018, online verfügbar unter: [https://www.kit.edu/kit/pi\\_2018\\_009\\_power-to-gas-mit-hohem-wirkungs-grad.php](https://www.kit.edu/kit/pi_2018_009_power-to-gas-mit-hohem-wirkungs-grad.php), zuletzt geprüft am 27. Juni 2018

Laurent, Fabien; *Optimierung des Oberleitungsnetzes bei einer Elektrifizierung des Busverkehrs mittels In-Motion-Charging am Beispiel der Berliner Verkehrsbetriebe (BVG)*, TU Berlin, 2017

Leuthardt, Helmut (Dipl.-Ing.); *Die Wirtschaftlichkeit von Gelenkbussen und Buszügen*; Der Nahverkehr 05/2010, 2010

Petit, Vianney; *Auswirkungen der Ladetechnologie auf den Busbetrieb bei Umstellung auf Elektroantrieb*, TU Braunschweig, 2017

Sachverständigenrat für Umweltfragen, *Umsteuern erforderlich: Klimaschutz im Verkehrssektor*, Sondergutachten November 2017, Berlin, 2017, online verfügbar unter: [https://www.umweltrat.de/SharedDocs/Downloads/DE/02\\_Sondergutachten/2016\\_2020/2017\\_11\\_SG\\_Klimaschutz\\_im\\_Verkehrssektor\\_KF.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=5](https://www.umweltrat.de/SharedDocs/Downloads/DE/02_Sondergutachten/2016_2020/2017_11_SG_Klimaschutz_im_Verkehrssektor_KF.pdf?__blob=publicationFile&v=5)

Schaufenster Elektromobilität, *E-Bus Berlin Gemeinsamer Abschlussbericht*, 2016

TU Dresden, *Stand und Entwicklungstendenzen bei elektrisch betriebenen Linienbussen*, 2017

## Impressum

### **Herausgeberin**

Senatsverwaltung für Umwelt, Verkehr und Klimaschutz  
Öffentlichkeitsarbeit  
Am Köllnischen Park 3  
10179 Berlin  
[www.berlin.de/sen/uvk/](http://www.berlin.de/sen/uvk/)

### **Inhalte und Bearbeitung**

Senatsverwaltung für Umwelt, Verkehr und Klimaschutz  
Abteilung Verkehr

### **Unterstützung bei der Bearbeitung durch**

Center Nahverkehr Berlin GbR  
Bernburger Straße 27  
10963 Berlin

Bearbeitungszeitraum: Januar 2017 bis Februar 2019

**Berlin, November 2019**